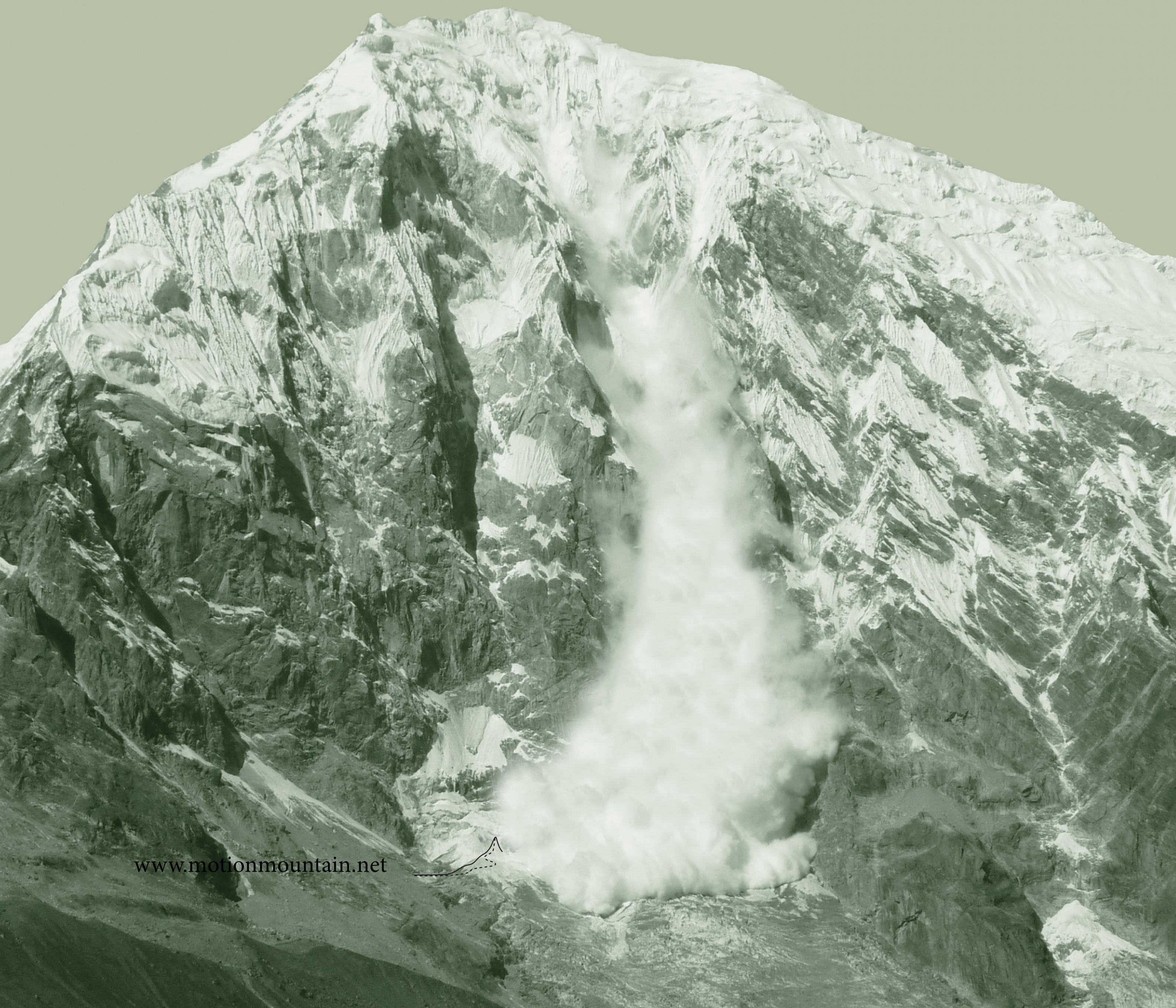
Christoph Schiller Dịch giả: Cao Sĩ Sơn

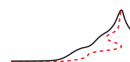
HÀNH SƠN

CUỘC PHIÊU LƯU CỦA VẬT LÝ – QUYỂN V

CHUYỂN ĐỘNG BÊN TRONG VẬT CHẤT

NIỀM HOAN LẠC, CÔNG NGHỆ VÀ NGÔI SAO

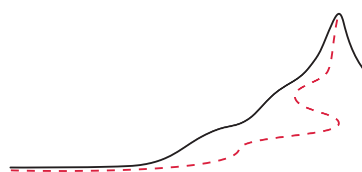




Christoph Schiller

Dịch giả: Cao Sĩ Sơn

Hành Sơn



Cuộc phiêu lưu của Vật lý

Quyển V

Chuyển động bên trong vật chất – Niềm hoan lạc, Công nghệ và Ngôi sao

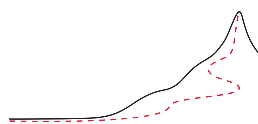
Ấn bản 31, có bản miễn phí dạng pdf kèm với film tại trang web www.motionmountain.net


BY NC ND

To Britta, Esther and Justus Aaron

τῷ ἐμοὶ δαὶμονι

Die Menschen stärken, die Sachen klären.



Lời mở đầu

> Primum movere, deinde docere.*
>
> Cổ nhân

Bộ sách này dành cho những người muốn tìm hiểu về chuyển động trong thiên nhiên. Sự vật, con người, động vật, hình ảnh và không gian chuyển động như thế nào? Câu trả lời dẫn tới nhiều cuộc phiêu lưu và quyển sách này trình bày về chuyển động trong vật chất, con người, động vật, ngôi sao và hạt nhân.

Chuyển động *trong các vật thể* – chết hay sống – đều nhỏ bé: do đó nó được mô tả bằng Thuyết lượng tử. Thuyết lượng tử mô tả mọi chuyển động bằng lượng tử tác dụng $\hbar$, độ biến đổi nhỏ nhất mà ta quan sát được trong thiên nhiên. Dựa trên ý tưởng cơ bản này, quyển sách sẽ trình bày cách mô tả về sự sống, cái chết và niềm hoan lạc. Kế đó, nó sẽ giải thích các hiện tượng Hoá học, Địa chất học, Khoa học vật liệu, Vật lý thiên văn và Vật lý hạt. Trong cấu trúc của Vật lý, các chủ đề này tương ứng với 3 điểm 'lượng tử' trong Hình 1. Câu chuyện về chuyển động tìm thấy bên trong tế bào sống, bên trong các chất khí lạnh nhất và các ngôi sao nóng nhất đều được kể ở đây theo một phương thức đơn giản, hiện đại và hấp dẫn.

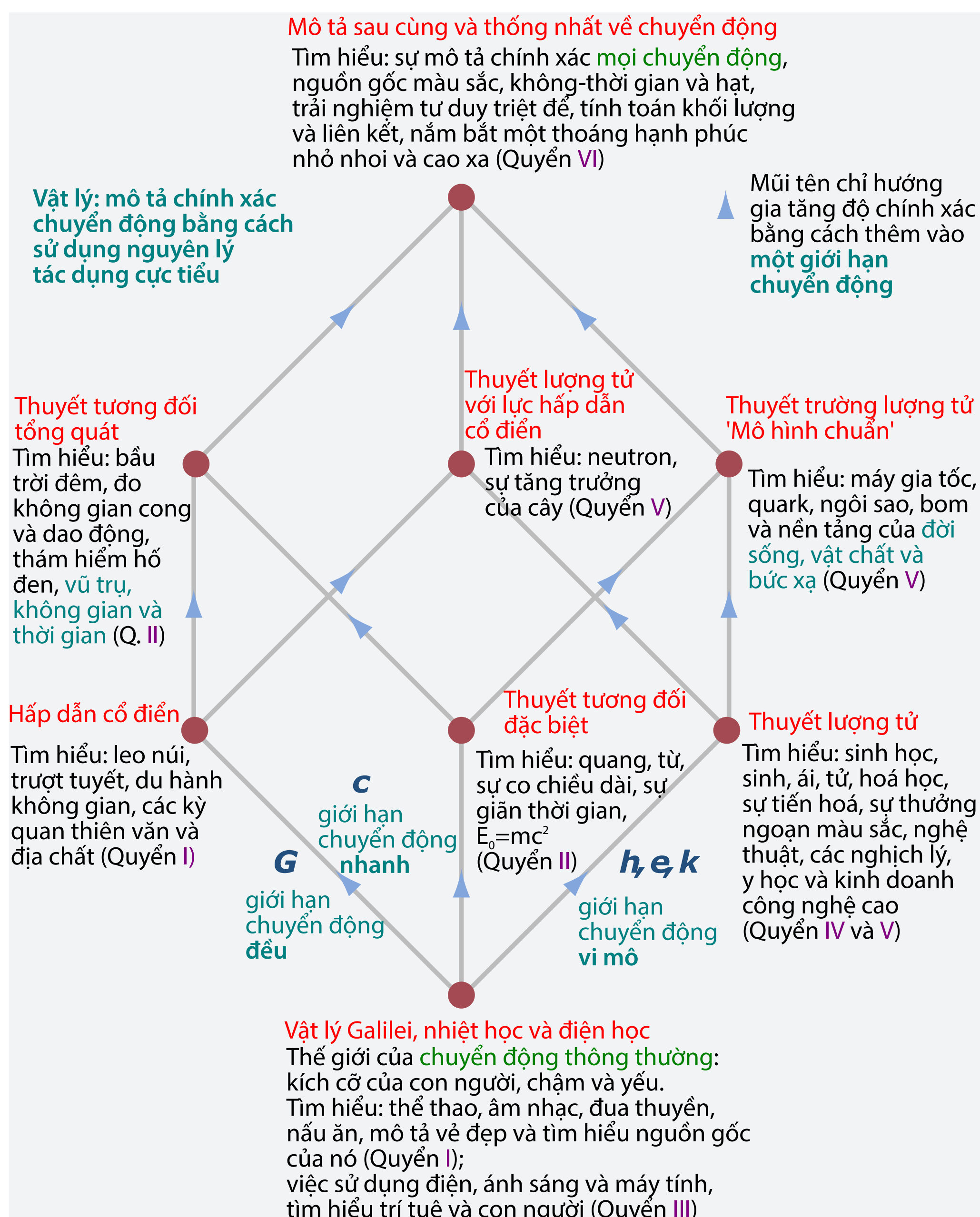
Với mục đích *đơn giản*, quyển sách sẽ tập trung vào các khái niệm và giới hạn phần toán học ở mức tối thiểu. Việc tìm hiểu các khái niệm vật lý được ưu tiên hơn việc sử dụng các công thức tính toán. Kiến thức của quyển sách chỉ ở trình độ của sinh viên đại học.

Với mục đích *hiện đại*, quyển sách sở hữu rất nhiều các tư liệu quý – cả lý thuyết lẫn thực nghiệm – rải rác trong nhiều tài liệu khoa học.

Với mục đích *hấp dẫn*, quyển sách sẽ cố gắng làm cho độc giả ngạc nhiên thật nhiều. Việc đọc một quyển sách vật lý đại cương sẽ giống như đi xem ảo thuật. Chúng ta xem, ngạc nhiên, không tin vào mắt mình, suy nghĩ và sau cùng ta hiểu được mánh lới của trò ảo thuật. Khi quan sát thiên nhiên, ta cũng có cùng một kinh nghiệm như thế. Thật vậy, mỗi trang sách đều chứa ít nhất một điều bất ngờ hay một sự khích động khiến độc giả phải ưu tư. Nhiều câu đố hấp dẫn sẽ được giới thiệu với độc giả.

Câu châm ngôn của quyển sách, *die Menschen stärken, die Sachen klären*, một phát biểu nổi tiếng về giáo dục, có thể dịch ra là: 'Làm cho con người trở nên mạnh mẽ, làm sáng tỏ mọi điều.' Việc làm sáng tỏ mọi điều – chỉ trung thành với sự thật – đòi hỏi sự can đảm, vì thay đổi tập quán suy nghĩ sẽ làm phát sinh sự sợ hãi, thường được che giấu bằng sự giận dữ.

* 'Chuyển động trước, giáo huấn sau.' Trong ngôn ngữ hiện đại, *lay động* (trái tim) được gọi là *khuyến khích*; cả hai từ đều có cùng ngữ căn Latin.



HÌNH 1 Một bản đồ đầy đủ của vật lý, khoa học về chuyển động, được Matvei Bronshtein (b. 1907 Vinnytsia, d. 1938 Leningrad) giới thiệu lần đầu tiên. Hình lập phương Bronshtein bắt đầu từ dưới cùng với chuyển động thông thường và cho thấy các mối liên hệ của nó với các lĩnh vực vật lý hiện đại. Hướng của các kết nối biểu diễn sự gia tăng độ chính xác của việc mô tả nhờ các giới hạn được thêm vào. Giới hạn của chuyển động đều là hằng số hấp dẫn G, của chuyển động nhanh là tốc độ ánh sáng c, và của chuyển động của các hạt vi mô là hằng số Planck h, điện tích sơ cấp e và hằng số Boltzmann k.

Nhưng bằng cách vượt qua nỗi sợ hãi chúng ta sẽ trở nên mạnh mẽ đồng thời sẽ cảm nhận được những xúc cảm mãnh liệt và tốt đẹp. Mọi cuộc phiêu lưu vĩ đại trong đời đều cho phép điều này xảy ra và việc tìm hiểu về chuyển động là một trong những cuộc phiêu lưu đó. Hãy tận hưởng điều này.

Munich và Sài Gòn, 05-2020

Cách sử dụng sách

Những ghi chú bên lề sẽ chỉ đến các tham chiếu thư tịch, các trang khác hay lời giải của các câu đố. Trong ấn bản màu, ghi chú bên lề, chỉ dấu tới cước chú và liên kết đến các website được tô màu xanh lục. Theo thời gian, các liên kết internet có thể biến mất. Đa số các liên kết đều có thể phục hồi thông qua trang www.archive.org, nơi lưu giữ các bản sao của các trang web cũ. Trong ấn bản miễn phí của sách này dưới dạng pdf, sẵn có tại trang www.motionmountain.net, mọi chỉ dấu và liên kết xanh lục đều có thể truy cập được. Ấn bản pdf cũng chứa tất cả các film có thể xem trực tiếp bằng Adobe Reader.

Lời giải và gợi ý của các *câu đố* được cho trong phụ lục. Các câu đố được phân loại thành các mức độ dễ (e), học sinh bình thường (s), khó (d) và mức độ nghiên cứu (r). Các câu đố chưa có lời giải trong sách được đánh dấu (ny).

Lời khuyên dành cho học viên

Học tập cho phép ta thấy được mình trong tương lai, giúp ta mở mang kiến thức, phát triển trí thông minh và cảm thấy tự hào. Do đó, học tập từ sách vở, đặc biệt là sách về tự nhiên, sẽ hiệu quả và thích thú. Hãy tránh xa các phương pháp học tập tệ hại như tránh bệnh dịch! Đừng dùng bút đánh dấu hay viết chì để làm nổi bật hay gạch dưới văn bản trên trang sách. Điều đó làm ta mất thì giờ, không thoải mái và làm cho văn bản trở nên khó đọc. Đừng học từ một màn hình. Đặc biệt, không bao giờ, học từ internet, video, game hay smartphone. Phần lớn internet, video và game là độc dược và ma tuý đối với não bộ. Smartphone là các nhà bào chế ma tuý làm người ta nghiện ngập và không học hành gì được. Không có ai đánh dấu lên trang giấy hay nhìn vào màn hình mà học hành có hiệu quả hay thích thú làm những việc như vậy.

Theo kinh nghiệm học và dạy học của tôi, có một phương pháp học tập để biến đổi một học sinh không đạt thành một học sinh thành công: nếu bạn đọc sách để học tập, hãy tóm tắt các phần đã đọc, *bằng cách đọc thật to bằng ngôn ngữ và hình ảnh riêng của bạn*. Nếu bạn không làm được như vậy, hãy đọc lại phần đó. Lặp lại quá trình này cho đến khi bạn có thể tóm tắt được những gì bạn đã đọc bằng cách trên. *Hãy thưởng thức* niềm vui của việc lớn tiếng kể chuyện! Bạn có thể làm việc này một mình hay với bạn bè, trong một căn phòng hay trong khi đi bộ. Nếu thành công, bạn sẽ giảm được một cách đáng kể thời gian học hành và đọc sách. Bạn sẽ thích thú hơn trong việc học từ những cuốn sách hay và bớt ghét những cuốn sách dở. Người làm chủ được phương pháp này có thể dùng nó ngay trong lúc nghe giảng bài, nhưng hạ thấp giọng, và sẽ tránh được việc ghi bài triền miên.

Lời khuyên dành cho giáo viên

Giáo viên thường thích có học trò và thích hướng dẫn học trò thám hiểm lĩnh vực mà họ đã chọn. Nhiệt tình với công việc là nguyên tắc cơ bản cho sự thoả mãn trong nghề nghiệp. Nếu bạn là một giáo viên, trước khi bắt đầu bài học, hãy tự hình dung, tự cảm nhận và tự nhủ về sự yêu thích chủ đề của bài học; tiếp theo bạn hãy tự hình dung, tự cảm nhận và tự nhủ về cách thức mà bạn sẽ dùng để hướng dẫn học trò của bạn có được sự yêu thích chủ đề đó giống như bạn. Hãy làm việc này một cách có ý thức, mỗi ngày. Bạn sẽ đỡ phải gặp các điều phiền toái trong lớp và thành công nhiều hơn trong việc giảng dạy của mình. Cuốn sách này không viết cho mục đích thi cử mà mục đích của nó là làm cho giáo viên và học sinh *hiểu* và *yêu thích* môn vật lý, khoa học của chuyển động.

Phản hồi

Ấn bản pdf mới nhất của bộ sách này đang và sẽ còn cho bạn đọc download miễn phí từ internet. Tôi rất mong nhận được email từ các bạn tại địa chỉ fb@motionmountain.net, đặc biệt về các vấn đề sau đây:

Câu đố 1 s

— Những điều chưa rõ ràng và nên cải tiến?
— Bạn chưa hiểu câu chuyện, chủ đề, câu đố, hình ảnh hay film nào?

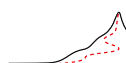
Tôi cũng hân hạnh đón nhận sự góp ý của các bạn về các điểm đặc biệt liệt kê trong trang web www.motionmountain.net/help.html. Mọi phản hồi sẽ được sử dụng để cải tiến ấn bản kế tiếp. Bạn có thể gởi phản hồi bằng mail hay file pdf có thêm các ghi chú màu vàng, hay cung cấp các hình minh hoạ, hình chụp, hay đóng góp vào trang errata wiki trên website. Nếu bạn muốn dịch một chương của cuốn sách sang ngôn ngữ của bạn, vui lòng cho tôi biết.

Thay mặt cho tất cả độc giả, xin cám ơn các bạn trước về các đóng góp này. Đối với các đóng góp đặc biệt hữu ích – nếu bạn muốn – bạn sẽ được ghi nhận trong phần cảm tạ, nhận quà thưởng, hay cả hai.

Trợ giúp

Chúng tôi rất hoan nghênh khi nhận được sự tài trợ từ các bạn cho tổ chức từ thiện, phi lợi nhuận (được miễn thuế) để soạn thảo, dịch thuật và phát hành bộ sách này. Để có thêm chi tiết hãy vào trang web www.motionmountain.net/donation.html. Sở thuế vụ của Đức sẽ kiểm tra việc sử dụng hợp thức nguồn tài trợ của bạn. Nếu bạn muốn, tên của bạn sẽ được ghi trong danh sách các nhà tài trợ. Thay mặt các độc giả trên toàn thế giới, chúng tôi xin cám ơn bạn trước.

Bản in trên giấy của bộ sách này, bản màu hay bản đen trắng, có bán trên www.amazon.com hay www.createspace.com. Và bây giờ, mời bạn thưởng thức cuốn sách.



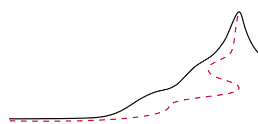
Mục lục



Chuyển động bên trong vật chất –

Niềm hoan lạc, Công nghệ và Ngôi sao

Trong cuộc hành trình tìm hiểu quy luật vận động của sự vật,
ta đã khám phá ra là có một độ biến thiên nhỏ nhất
trong thiên nhiên dẫn tới
sự xuất hiện của niềm hoan lạc,
cách sàn nhà nâng đỡ khiến cơ thể của ta không rơi xuống,
tương tác là sự trao đổi các hạt bức xạ,
vật chất không trường tồn,
các hiệu ứng lượng tử giúp ta an khang thịnh vượng,
không gian trống rỗng kéo các tấm gương lại gần nhau,
lý do các ngôi sao toả sáng,
nguồn gốc các nguyên tử tạo nên cơ thể chúng ta,
phương thức mà các hạt lượng tử đã tạo ra thế giới này,
việc bơi lội và bay lượn không phải là điều dễ dàng.



Chương 1

Chuyển động để thưởng ngoạn cuộc đời

> Homo sum, humani nil a me alienum puto.**
>
> Terence

Kể từ lúc bắt đầu tìm hiểu các hiệu ứng lượng tử trong quyển trước, vẫn còn nhiều điều kỳ thú trong Vật lý lượng tử *ứng dụng* chờ đón chúng ta. Lượng tử tác dụng $\hbar$ tạo ra nhiều hệ quả có ý nghĩa trong Y học, Sinh học, Hoá học, Khoa học vật liệu, Kỹ nghệ và ánh sáng phát ra từ các ngôi sao. Nghệ thuật, nơi sử dụng màu sắc, vật liệu cùng các quá trình sáng tạo của nghệ sĩ, đều dựa trên nền tảng lượng tử tác dụng. Theo quan điểm vật lý thì các lĩnh vực này đều nghiên cứu *chuyển động bên trong vật chất*. Ta đã thấy bên trong vật chất chủ yếu là các chuyển động của các hạt lượng tử bé nhỏ.*** Do đó, việc tìm hiểu và mô tả chính xác vật chất cần đến *Vật lý lượng tử*. Trong phần sau đây, ta chỉ tìm hiểu những nét chính nhưng là những điểm tiêu biểu và quan trọng. Ta sẽ bắt đầu thám hiểm chuyển động bên trong vật chất qua ba dạng đặc biệt quan trọng đối với chúng ta: đời sống, sinh và tử. Như ta đã nói ở phần đầu của Vật lý lượng tử là không có dạng chuyển động nào mô tả được bằng Vật lý cổ điển. Thật vậy, đời sống, sinh và tử là các hiệu ứng lượng tử. Hơn nữa, mọi nhận thức, mọi cảm xúc, mọi niềm hoan lạc đều là hiệu ứng lượng tử. Điều này cũng đúng đối với mọi hoạt động của chúng ta.

Quyển IV, trang 15

Từ Vật lý lượng tử tới các bộ máy sinh học và sự tiểu hình hoá

Toàn bộ Thuyết lượng tử có thể tóm tắt trong một câu:

> ▷ Trong thiên nhiên, không thể quan sát được tác dụng hay biến đổi nhỏ hơn $\hbar = 1.1 \cdot 10^{-34}$ Js.

Sau đây ta sẽ tìm hiểu xem tại sao điều này lại giải thích được sự sống, niềm hoan lạc và cái chết. Một hệ quả quan trọng và nổi tiếng của lượng tử tác dụng là

> ▷ Một vật nếu chuyển động, phải do các hạt lượng tử, hay quanton, tạo nên.

** ‘Tôi là người và không có gì của loài người lại xa lạ đối với tôi.’ Terence là Publius Terentius Afer (b. *c.* 190 Carthago, d. 159 BCE Greece), thi sĩ La Mã nổi tiếng. Ông viết câu này trong vở kịch *Heauton Timorumenos*, đoạn 77.

*** Bức ảnh ở Trang 14 cho ta thấy một bong bóng xà bông, chuyển động của chất lỏng bên trong nó và các màu sắc do hiện tượng giao thoa; hình do Jason Tozer của Creative Review/Sony chụp và giữ bản quyền.

Starting size: the dot on the letter i – final size:





HÌNH 2 Sự tăng trưởng nhờ trao đổi chất có thể gặp từ những đơn bào, có đường kính cỡ 0.1 mm, tới các sinh vật có kích thước 25 m như cây baobab hay cá voi xanh (© Ferdinand Reus, NOAA).

Ta sẽ lần lượt khám phá cách thể hiện các mệnh đề này trong hành trạng của sinh vật. Nhưng sinh vật là gì?

Sinh vật là các hệ vật lý có sự biến dưỡng, xử lý thông tin, trao đổi thông tin, sinh sản và chuyển động. Mọi tính chất này có thể cô đọng trong một câu:

▷ *Sinh vật* là một tập hợp các bộ máy có thể tự sinh sản.

Bằng danh từ *tự*-sinh sản, ta muốn nói rằng hệ đã sử dụng cơ chế biến dưỡng của riêng nó để tái sinh. Có nhiều thí dụ về các vật sinh sản và các vật mà ta không thể gọi là sinh vật. Bạn có thể tìm ra các thí dụ khác không? Để tránh hiểu lầm, khi ta nói 'sinh sản' dưới đây là ta muốn nói 'tự-sinh sản'.

Câu đố 2 s

Trước khi tìm hiểu định nghĩa về sinh vật kỹ hơn, ta cần nhấn mạnh rằng sự tự-sinh sản sẽ được đơn giản hoá nếu hệ được thu nhỏ. Do đó, phần lớn sinh vật là các bộ máy cực kỳ nhỏ phù hợp với công việc mà chúng thực hiện. Ta sẽ thấy rõ điều này khi đem sinh vật so sánh với máy móc do con người tạo ra. Sự nhỏ bé của sinh vật khiến ta ngạc nhiên vì việc thiết kế và làm ra các máy móc nhân tạo không đòi hỏi nhiều yêu cầu như vậy.

1. Máy móc nhân tạo không cần khả năng sinh sản; kết quả là ta có thể tạo ra chúng từ nhiều phần và có thể bao gồm nhiều phần vĩ mô có thể quay tròn. Điều này tương phản với sinh vật, được tạo ra từ một mảnh vật chất đơn giản và không thể sử dụng các bánh xe, bánh lái, hộp số hay ốc vít.
2. Máy móc nhân tạo có thể sử dụng kim loại, gốm, chất độc hại và nhiều vật liệu mà sinh vật không sử dụng được.
3. Máy móc nhân tạo không cần tự kết hợp và tăng trưởng; ngược lại, sinh vật luôn luôn cần mang theo các nhà máy hoá chất có sẵn.
4. Máy móc nhân tạo có thể được lắp ráp và vận hành ở các nhiệt độ khác nhau, khác hẳn với sinh vật.

Dù chịu những ràng buộc kỹ thuật nghiêm ngặt này, sinh vật vẫn giữ nhiều kỷ lục thế giới về sự thu nhỏ trong lĩnh vực máy móc:

— Tính cho đến nay, Não có năng lực xử lý thông tin tính trên đơn vị thể tích mạnh nhất trong các thiết bị tính toán. Chỉ cần nhìn vào kích thước của nhà vô địch cờ vua Gary Kasparov và kích thước của đối thủ máy tính đã hạ ông ta. Hay nhìn vào kích thước các máy tính được thiết kế để nói chuyện được.
— Não có bộ nhớ có tốc độ và mật độ cao nhất trong các thiết bị nhớ. Một bộ CD hay DVD so với não có thể tích lớn hơn hàng ngàn lần.
— Động cơ trong sinh vật có bậc của độ lớn nhỏ hơn máy móc nhân tạo. Bạn chỉ cần nghĩ về cơ trong chân của một con kiến.
Quyển III, trang 267
— Gia tốc của sinh vật hơn hẳn gia tốc của máy móc nhân tạo xét về bậc của độ lớn. Không có máy nào đạt được gia tốc của một con cào cào, con ruồi hay con nòng nọc.
— Sinh vật bay, bơi hay bò – như ruồi, phiêu sinh vật hay amíp – vẫn nhỏ hơn máy móc nhân tạo hàng ngàn lần. Đặc biệt, đã có các hệ đạo hàng của thiên nhiên nhỏ hơn các hệ của con người làm ra rất nhiều.
— Hiệu suất của các cảm biến sinh vật, như mắt hay tai, đã vượt qua máy móc hiện đại của con người. Mũi nhân tạo thì thua xa thiên nhiên. *Kích thước* của cảm biến được

phát triển qua sự tiến hoá – như tai mắt của một con ruồi – vẫn còn vô địch.

Câu đố 3 s
— Bạn có thể kể thêm các thí dụ khác không?

Kích thước cực nhỏ của sinh vật – so với máy móc nhân tạo – bắt nguồn từ sự đấu tranh liên tục để cho việc tạo dựng có hiệu quả. Sự hiệu quả có 3 mặt chính. Đầu tiên, trong cấu trúc của sinh vật, *mọi vật đều được kết nối với các vật khác.* Các phần đều ảnh hưởng đến nhau. Thật vậy, bốn quá trình cơ bản trong cuộc sống, cụ thể là các quá trình về biến dưỡng, cơ, hormon và điện, đều liên kết với nhau trong không gian và thời gian. Thí dụ như trong con người, sự hô hấp giúp cho sự tiêu hoá; 'các chuyển động của đầu' bơm chất lỏng qua cột sống; một hormone ảnh hưởng đến nhiều quá trình sinh hoá. Thứ hai, Câu đố 4 e *mọi phần trong sinh hệ đều có nhiều hơn một chức năng.* Thí dụ, xương tạo ra cấu trúc của cơ thể và sản xuất máu; móng tay là công cụ và cũng là kho chất thải hoá học. Sinh Câu đố 5 e hệ sử dụng nhiều quá trình tối ưu hoá như vậy. Sau cùng nhưng không kém phần quan trọng, sinh hệ được thu nhỏ đến mức *tối ưu* vì chúng đã sử dụng một cách hiệu quả các hiệu ứng lượng tử. Thật vậy, mỗi chức năng đơn lẻ trong sinh vật đều dựa vào lượng tử tác dụng. Và mỗi chức năng như vậy đều được tiểu hình hoá cực tốt. Ta thử tìm hiểu thêm vài trường hợp quan trọng nữa.

Sự sinh sản

> “Tìm được bạn đời là một phần thưởng lớn nhất của cuộc sống.”
>
> Quan điểm của các nhà sinh học.

Mọi phức tạp đáng kinh ngạc của sự sống đều tập trung vào sự sinh sản. *Sự sinh sản*, hay chính xác hơn, *sự tự-sinh sản*, là khả năng của một vật tạo ra các vật khác tương tự với nó. Thuyết lượng tử đã cho ta biết là chỉ có thể tạo ra một vật *tương tự*, vì một bản sao Quyển IV, trang 123 *chính xác* sẽ mâu thuẫn với lượng tử tác dụng. Nhưng giới hạn này không phải là một điều bất tiện: một bản sao không hoàn hảo rất cần thiết cho đời sống; thật vậy, một bản sao tương tự, không hoàn hảo, là bản chất của sự tiến hoá sinh học, sự thay đổi và sự chuyên biệt hoá.

Sự sinh sản được đặc trưng bằng sự thay đổi ngẫu nhiên, hay còn gọi là *sự đột biến*, tạo ra sự phân biệt thế hệ này với thế hệ khác. Các quy luật thống kê của sự đột biến, thí dụ như các 'định luật' di truyền của Mendel và việc thiếu các trạng thái trung gian là các hệ quả trực tiếp của Thuyết lượng tử. Nói cách khác, sự sinh sản và sự di truyền là các hiệu ứng lượng tử.

Sự sinh sản đòi hỏi *sự tăng trưởng* và sự tăng trưởng cần sự biến dưỡng. *Sự biến dưỡng* là một quá trình hoá học và là một quá trình lượng tử, khai thác năng lượng, khai thác Trang 58 vật liệu, thực hiện sự tăng trưởng, chữa lành các vết thương và thực hiện sự sinh sản.

Vì sự sinh sản đòi hỏi sự gia tăng khối lượng, như ta thấy trong Hình 2, mọi vật hữu sinh đều thể hiện sự biến dưỡng và tăng trưởng. Để sự tăng trưởng dẫn tới kết quả là một vật tương tự với vật ban đầu, ta cần một *bản thiết kế*. Bản thiết kế này phải giống với bản đã được thế hệ trước sử dụng. Chỉ có thể tổ chức sự tăng trưởng theo một bản thiết kế nếu thiên nhiên được tạo thành từ các thực thể nhỏ nhất có thể lắp ráp theo bản thiết kế đó.

Như vậy ta suy ra: sự sinh sản và sự tăng trưởng hàm ý vật chất được tạo thành từ các thực thể nhỏ nhất. Nếu không thì không thể có sự sinh sản. Việc có sự sinh sản dẫn



HÌNH 3 Máy lượng tử (© Elmar Bartel).

tới sự cần thiết phải có nguyên tử và Thuyết lượng tử! Thật vậy, không có lượng tử tác dụng sẽ không có phân tử DNA và sẽ không có cách nào để ta truyền lại các đặc tính – bản thiết kế của riêng ta – cho con của mình.

Việc lưu truyền một bản thiết kế từ thế hệ này sang thế hệ khác đòi hỏi sinh vật phải có cách lưu trữ thông tin. Sinh vật phải có bộ nhớ trong. Ta đã biết rằng một hệ thống có bộ nhớ phải được *nhiều* vi hạt tạo thành: vì không có cách nào khác để lưu trữ và bảo đảm cho thông tin được bền vững theo thời gian. Cần nhiều hạt để bảo vệ thông tin khỏi ảnh hưởng của thế giới bên ngoài.

Quyển I, trang 403

Bản thiết kế của riêng ta được lưu trữ trong các phân tử DNA nằm trong nhân và các ty thể của hàng triệu tế bào bên trong cơ thể chúng ta. Như vậy bản thiết kế được lưu trữ và bảo vệ thực sự nhờ sự giúp đỡ của *nhiều* vi hạt. Do đó sự sinh sản trước tiên là sự lưu truyền DNA của cha mẹ sang thế hệ kế tiếp. Sự lưu truyền này là một thí dụ về chuyển động. Hoá ra chuyển động này và các thí dụ khác về chuyển động trong cơ thể chúng ta xảy ra theo cùng một cách, cụ thể là nhờ sự giúp đỡ của các máy phân tử.

Trang 62

Máy lượng tử

Sinh vật chuyển động. Để sinh sản được, sinh vật phải có khả năng chuyển động theo cách tự định hướng.

▷ Một hệ có khả năng thực hiện các chuyển động tự định hướng được gọi là *máy*.

Mọi vật có khả năng tự sinh sản, như trong Hình 3, là một cái máy. Máy không cần tăng trưởng nhưng cũng cần nhiên liệu và như vậy cần một cơ chế biến dưỡng. Mọi máy móc, sống hoặc không, đều dựa trên các hiệu ứng lượng tử.

Các máy sống hoạt động như thế nào? Theo quan điểm vật lý cơ bản ta chỉ cần một số kiến thức đã đề cập trong sách này để mô tả chúng: ta cần QED và một vài chỗ cần lực vạn vật hấp dẫn. Nói một cách đơn giản, đời sống là một quá trình điện từ xảy ra trong trường hấp dẫn yếu.* Nhưng còn nhiều chi tiết rắc rối và thú vị trong phát biểu này.

* Đúng ra các tương tác hạt nhân cũng có vai trò quan trọng trong đời sống: các tia vũ trụ là nguồn gốc của

BẢNG 1 Chuyển động và máy phân tử tìm thấy trong sinh vật.

Loại chuyển động	Thí dụ	Động cơ liên quan
Tăng trưởng	các quá trình của một tập thể phân tử trong sự tăng trưởng, sự thay đổi hình dạng và động tính của tế bào	động cơ phân tử tuyến tính, bơm ion
	mở và tắt gen	động cơ phân tử tuyến tính
	sự lão hoá	động cơ phân tử tuyến tính
Tạo hình	vận chuyển vật liệu (polysaccharide, lipid, protein, acid nucleic, vật liệu khác)	cơ, động cơ phân tử tuyến tính
	lực và tương tác giữa các sinh phân tử và tế bào	bơm trong màng tế bào
Hoạt động	sự biến dưỡng (hô hấp, tiêu hoá)	cơ, ATP synthase, bơm ion
	hoạt động của cơ	động cơ phân tử tuyến tính, bơm ion
	nhiệt động lực học của toàn bộ sinh hệ và các phần của nó	cơ
	sự truyền tín hiệu thần kinh	chuyển động của ion, bơm ion
	hoạt động của não, tư duy	chuyển động của ion, bơm ion
	ký ức: tăng cường ký ức dài hạn	bơm hoá học
	ký ức: sự tăng trưởng của synapse	động cơ phân tử tuyến tính
	sự sản xuất hormone	bơm hoá học
	sự suy yếu	động tính của tế bào, bơm hoá học
	sự nhiễm virus của tế bào	động cơ phân tử quay dành cho sự vận chuyển RNA
Phòng vệ	hệ miễn dịch	động tính của tế bào, động cơ phân tử tuyến tính
	sự đông máu	bơm hoá học
	sự làm sạch phế quản	động cơ tiêm mao
Cảm giác	thị giác	bơm hoá học, bơm ion
	thính giác	thụ thể chuyển động của lông tóc, bơm ion, động cơ phân tử quay
	khứu giác	bơm ion
	xúc giác	bơm ion
Sinh sản	lưu trữ và truy lục thông tin	động cơ phân tử tuyến tính và quay trong nhân tế bào
	sự bào phân, chuyển động của bào quan	động cơ phân tử tuyến tính, polymerase
	chuyển động của tinh trùng	động cơ phân tử tuyến tính
	quyến rũ, sử dụng não và cơ	động cơ phân tử tuyến tính, bơm ion

Ta có thể nói rằng *sinh vật là các hệ mà chuyển động của chúng đối với môi trường nhanh hơn phân tử.* Thí nghiệm chứng tỏ rằng sinh vật chuyển động càng nhanh khi chúng càng lớn. Thí nghiệm cũng chứng tỏ rằng sinh vật đạt được tốc độ này bằng cách sử dụng một số khổng lồ các máy tí hon, được tạo thành từ một hay chỉ vài phân tử hoạt động chung với nhau. Các máy này đã thực hiện nhiều quá trình quan trọng đối với cuộc sống.

Xem 2

Một tổng quan về các quá trình xảy ra trong sinh vật được ghi trong Bảng 1. Điểm chính yếu mà bảng này cho ta thấy là các quá trình đều bắt nguồn từ *các máy phân tử.*

▷ Sinh vật là tập hợp một số rất lớn các máy phân tử đã được chuyên biệt hoá.

Máy phân tử là một trong những thiết bị kỳ diệu nhất được tìm thấy trong thiên nhiên. Bảng 1 cũng chứng tỏ rằng thiên nhiên chỉ cần một vài thiết bị như vậy để thực hiện tất cả các loại chuyển động mà con người và sinh vật sử dụng: *bơm phân tử* và *động cơ phân tử*. Trong một thời gian dài mà sinh vật đã trải qua, các thiết bị này cực kỳ hữu hiệu. Chúng được tìm thấy trong mọi tế bào, bao gồm sinh vật trong Hình 5. Các động cơ phân tử chuyên biệt hoá trong sinh giới là bơm ion, bơm hoá học cùng với các động cơ phân tử quay và tuyến tính. Bơm ion và bơm hoá học được tìm thấy *trong* các màng và vận chuyển vật chất *ngang qua* các màng đó. Các động cơ phân tử quay và tuyến tính làm chuyển động các cấu trúc *trên* các màng. Mặc dù ta vẫn còn phải tìm hiểu nhiều về các máy phân tử nhưng với những điều ít ỏi mà ta đã biết thì cũng đã là ngoạn mục lắm rồi.

Xem 3

Chúng ta chuyển động như thế nào? – Động cơ phân tử

Cơ của chúng ta đã hoạt động như thế nào?Dựa trên động cơ nào? Một trong những thành tựu đẹp đẽ của Sinh học hiện đại là làm sáng tỏ điều này.

▷ *Cơ* hoạt động được nhờ chúng có chứa các phân tử có thể thay đổi hình dạng khi được cung cấp năng lượng.

Sự thay đổi hình dạng *có thể lặp lại*. Sự tổ hợp và lặp lại một cách thông minh các thay đổi hình dạng phân tử được sử dụng để tạo ra các chuyển động vĩ mô.

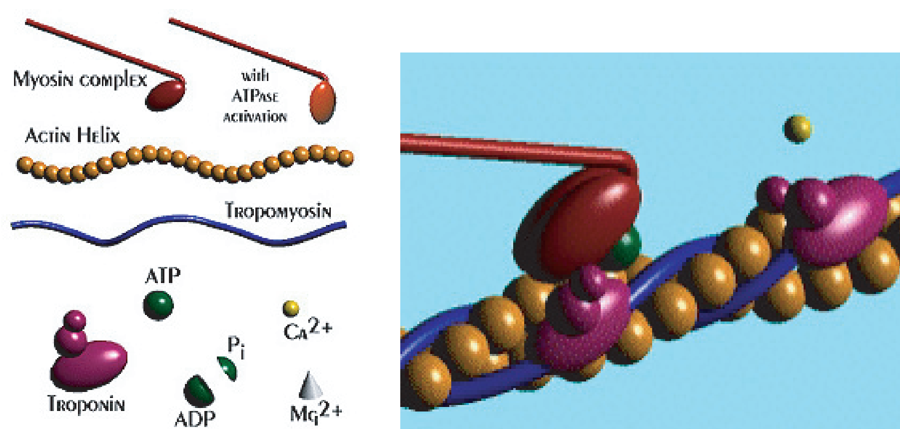
▷ Một phân tử có thể thay đổi hình dạng là một động cơ phân tử.

---

sự đột biến, rất quan trọng trong sự tiến hoá. Các nhà trồng trọt thường sử dụng các nguồn phóng xạ để làm tăng tốc độ đột biến. Phóng xạ có thể gây tử vong nhưng cũng được sử dụng trong y học. Tương tác hạt nhân cũng tiềm ẩn trong đời sống trên nhiều phương diện. Cần có các tương tác hạt nhân để tạo thành các nguyên tử – carbon, oxygen, v.v... – cần thiết cho đời sống. Tương tác hạt nhân ẩn sau cơ chế chủ yếu của các phản ứng trong Mặt trời, cung cấp năng lượng cho cây cỏ, loài người và mọi sinh vật khác (trừ một vài loại vi khuẩn ở những nơi khó tìm đến).

Xem 1

Tóm lại, tương tác hạt nhân đôi khi có ảnh hưởng đến sự sinh và diệt của cuộc sống nhưng thường thì không có vai trò quan trọng trong hoạt động của các sinh vật đặc biệt.



HÌNH 4 Hình bên trái: myosin và actin là 2 phân tử protein tạo ra động cơ phân tử tuyến tính quan trọng nhất trong sinh vật, bao gồm các chuyển động của cơ. Hình bên phải: bước chuyển động dài 5.5 nm; nó đã được làm chậm lại khoảng 10 lần (hình và QuickTime film © San Diego State University, Jeff Sale và Roger Sabbadini).

Có 3 loại động cơ phân tử cơ bản trong thiên nhiên: động cơ tuyến tính, động cơ quay và bơm.

1. *Động cơ phân tử tuyến tính* là nền tảng của chuyển động của cơ; một thí dụ được cho trong Hình 4. Các động cơ tuyến tính khác có nhiệm vụ tách gene trong hiện tượng bào phân. Động cơ tuyến tính cũng di chuyển các bào quan trong tế bào và di chuyển các tế bào khắp cơ thể trong sự tăng trưởng của phôi, khi chữa lành vết thương và trong mọi chuyển động khác của tế bào. Bộ lắp ghép các phân tử, trong việc sao chép DNA, cũng có thể được xem là các động cơ tuyến tính.

Một động cơ tuyến tính điển hình tiêu thụ khoảng từ 100 tới 1000 phân tử ATP mỗi giây, tức vào khoảng từ 10 tới 100 aW. Con số này nhỏ; điều đáng ngạc nhiên hơn khi ta Câu đố 6 s biết rằng công suất do tiếng ồn trắng của nước quanh ta là 10 nW. Nói cách khác, công suất của tiếng ồn quanh ta lớn hơn công suất động cơ phân tử từ 8 đến 9 lần! Tỷ số này cho ta thấy động cơ phân tử tuyệt vời như thế nào. Ở tầm cỡ chúng ta, điều này tương đương với việc lái một cái xe đi xuyên qua một cơn bão hay một trận động đất.

Quyển I, trang 93 2. Ta đã gặp *động cơ quay* trước kia; thiên nhiên sử dụng chúng để vẩy các tiêm mao Xem 4 của nhiều vi khuẩn cũng như đuôi của tinh trùng. Các nhà nghiên cứu cũng đã khám phá ra rằng sự tiến hoá đã tạo ra các động cơ phân tử có thể quay tròn các xoắn DNA giống như bu-lông có động cơ có thể quay tròn như một đinh ốc. Những động cơ như vậy được gắn vào đầu một số virus và đưa các DNA vào trong thân virus khi chúng được các tế bào bị nhiễm tạo ra hay trích xuất các DNA từ virus sau khi nó đã nhiễm vào tế Xem 5 bào. Động cơ quay quan trọng nhất, và nhỏ nhất cho tới nay – đường kính 10 nm và cao Trang 25 8 nm – là synthase ATP, một protein tổng hợp phần lớn ATP trong các tế bào.

3. *Bơm phân tử* cũng quan trọng đối với đời sống. Chúng bơm hoá chất, như ion hay các phân tử đặc biệt, vào hay ra khỏi tế bào, nhờ sử dụng năng lượng. Chúng có thể hoạt động ngay cả khi gradient nồng độ có chiều ngược lại. Bơm phân tử đóng vai trò quan trọng trong việc giữ cho đời sống là một quá trình *không* cân bằng. Việc hư hỏng các bơm phân tử là nguyên nhân gây ra nhiều tổn hại cho sức khoẻ, như việc mất nước khi



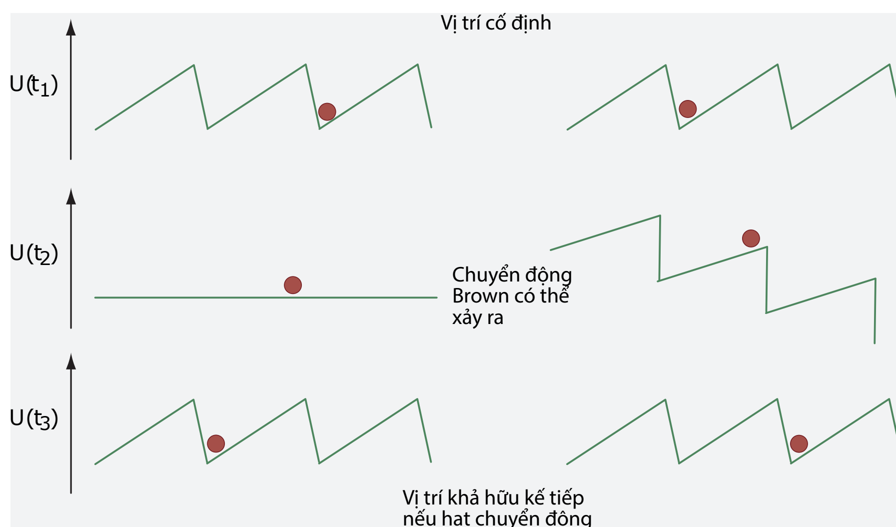
HÌNH 5 Trứng của một con nhím biển có tinh trùng, hay các động cơ phân tử đang hoạt động, bao quanh: động cơ phân tử đang làm tinh trùng chuyển động, khiến cho sự thụ tinh và sự bào phân xảy ra (photo by Kristina Yu, © Exploratorium www.exploratorium.edu).

ta bị bệnh tả.

Trong phần dưới đây ta sẽ tìm hiểu một số động cơ phân tử đặc biệt được tìm thấy trong tế bào. Trong thập niên 1980 người ta đã tìm ra cơ chế hoạt động của các động cơ tuyến Xem 6 tính. Các kết quả này đã tạo ra một phong trào nghiên cứu các động cơ phân tử được tìm thấy trong thiên nhiên. Việc nghiên cứu chứng tỏ rằng động cơ phân tử khác với phần lớn các động cơ thông thường: động cơ phân tử *không* bị ảnh hưởng bởi gradient nhiệt độ như động cơ xe hơi, *không* liên quan tới dòng điện như động cơ điện, và *không* phụ thuộc vào gradient nồng độ kiểu chuyển động cảm ứng hoá học, chẳng hạn như sự nở của một cái bánh.

Động cơ phân tử tuyến tính

Phần tử chính của một động cơ phân tử tuyến tính là một tổ hợp của 2 phân tử protein, cụ thể là myosin và actin. Myosin thay đổi giữa 2 hình dạng và nói theo nghĩa đen là *đi bộ* dọc theo actin. Nó chuyển động từng bước nhỏ đều đặn như ta thấy trong Hình 4. Người ta đã đo được kích thước của bước chuyển động này bằng một số thí nghiệm khéo léo. Nó luôn luôn bằng một bội số nguyên của 5.5 nm. Một bước, thường là về phía trước, nhưng Xem 6 cũng có lúc về phía sau, là kết quả của việc một phân tử ATP (adenosine triphosphate), nhiên liệu sinh học tiêu chuẩn, thuỷ phân thành ADP (adenosine diphosphate) và toả ra năng lượng chứa trong liên kết hoá học. Lực sinh ra có cường độ khoảng từ 3 tới 4 pN;



HÌNH 6 Hai loại động cơ Brown: chuyển thế (hình bên trái) và lệch thế (hình bên phải).

các bước có thể lặp lại nhiều lần trong 1 giây. Chuyển động của cơ là kết quả của hàng tỷ các bước sơ cấp phối hợp với nhau.

Tại sao động cơ phân tử này hoạt động được? Động cơ phân tử này nhỏ đến nỗi tiếng ồn của chuyển động Brown của các phân tử chất lỏng chung quanh nó cực kỳ lớn. Thật vậy, sự biến đổi từ một chuyển động phân tử vô trật tự thành một chuyển động vĩ mô có trật tự là một điều kỳ diệu nhất của thiên nhiên.

Sự tiến hoá rất thông minh: bằng 3 thủ thuật, nó đã lợi dụng chuyển động Brown để biến chuyển động này thành chuyển động vĩ mô. (Do đó động cơ phân tử còn được gọi là *động cơ Brown*.) Thủ thuật đầu tiên là sử dụng một thế bất đối xứng nhưng tuần hoàn, gọi là *ratchet/bánh cóc*.* Thủ thuật thứ hai là sự biến đổi nhất thời của thế, cùng với việc thêm năng lượng để gây ra sự biến đổi. Việc thực hiện 2 thủ thuật quan trọng nhất được
Xem 7
trình bày trong Hình 6. Như vậy động cơ phân tử hoạt động không theo nguyên tắc cân bằng nhiệt. Thủ thuật 3 là tổng hợp tác dụng của các động cơ phân tử này.

Sự biến đổi thế một cách tuần hoàn trong động cơ phân tử khiến cho trong một thời gian ngắn, thời gian xảy ra các chuyển động Brown của phân tử – thường là 1 µm/s – có ảnh hưởng đến vị trí của phân tử. Sau đó, phân tử lại cố định. Trong phần lớn các khoảng thời gian ngắn của chuyển động Brown, vị trí của phân tử sẽ không đổi. Nhưng khi vị trí thay đổi thì sự bất đối xứng của thế răng cưa sẽ khiến cho phân tử chuyển động theo một hướng ưu tiên có xác suất lớn hơn. (Phim hoạt hình trong Hình 4 không mô tả sự khác thường này.) Sau đó phân tử chờ sự biến đổi thế kế tiếp. Tính trung bình, phân tử myosin sẽ chuyển động theo một hướng. Hiện nay người ta có thể theo dõi chuyển động của các đơn phân tử nhờ các bộ dụng cụ thí nghiệm đặc biệt. Các thí nghiệm này chứng tỏ rằng cơ sử dụng một cơ chế bánh răng như vậy. Phân tử ATP thêm năng lượng vào trong hệ và kích khởi sự biến đổi thế thông qua sự thay đổi hình dạng của phân tử myosin. Thiên nhiên gộp hàng triệu răng cưa loại này với nhau: đó là cách hoạt động của cơ.

* Nó đã được gọi theo tên của Ratchet Gearloose, nhà phát minh nổi tiếng ở Duckburg.



HÌNH 7 Một bánh cóc cổ điển, ở đây thuộc loại áp điện, chuyển động giống một động cơ phân tử tuyến tính (© PiezoMotor).

Kỹ thuật và sự tiến hoá có sự lựa chọn khác nhau. Xe máy có một động cơ. Xe ô tô đắt tiền có khoảng 100 động cơ. Con người có ít nhất 10^{16} động cơ.

Câu đố 7 e

Một động cơ phân tử tuyến tính khác cũng được nghiên cứu nhiều là hệ vi quản kinesin mang các bào quan từ nơi này sang nơi khác trong tế bào. Giống như thí dụ trước, trong trường hợp này, hoá năng được biến đổi thành chuyển động đơn hướng. Các nhà nghiên cứu có thể gắn các hạt silica nhỏ vào các đơn phân tử và theo dõi chuyển động của chúng. Sử dụng các chùm laser, người ta có thể tác dụng lực vào các đơn phân tử này. Người ta thấy kinesin chuyển động với tốc độ khoảng 800 nm/s, với các bước là bội số của 8 nm, mỗi lần sử dụng một phân tử ATP và tác dụng một lực khoảng 6 pN.

Động cơ bánh răng lượng tử không chỉ hiện hữu trong sinh hệ; chúng cũng có mặt trong các hệ nhân tạo. Thí dụ như động cơ điện làm chuyển động một electron và động cơ quang điều khiển các vi hạt. Các ứng dụng này được nghiên cứu trong nhiều chương trình thực nghiệm khác nhau.

Cũng có *bánh cóc* cổ điển. Thí dụ như trong đồng hồ cơ học hay trong bút bi. Một thí dụ khác về bánh răng có các bước cơ bất đối xứng sử dụng hiệu ứng Leidenfrost để chuyển nhanh các giọt chất lỏng nhỏ, như ta thấy trong film www.thisiscolossal.com/2014/03/water-maze. Một thí dụ nữa trong Hình 7; thật ra có nhiều bộ dẫn động áp điện hoạt động như một bánh cóc và trên internet có rất nhiều film cho thấy cách hoạt động của chúng. Bánh cóc áp điện, còn được gọi là *động cơ siêu âm*, có mặt trong bộ phận phát hiện các chuyển động một cách chính xác và trong vật kính zoom tự động của các máy chụp ảnh đắt tiền. Nhiều kính hiển vi lực nguyên tử và kính hiển vi điện tử quét cũng sử dụng các bộ truyền động răng cưa.

Quyển I, trang 375

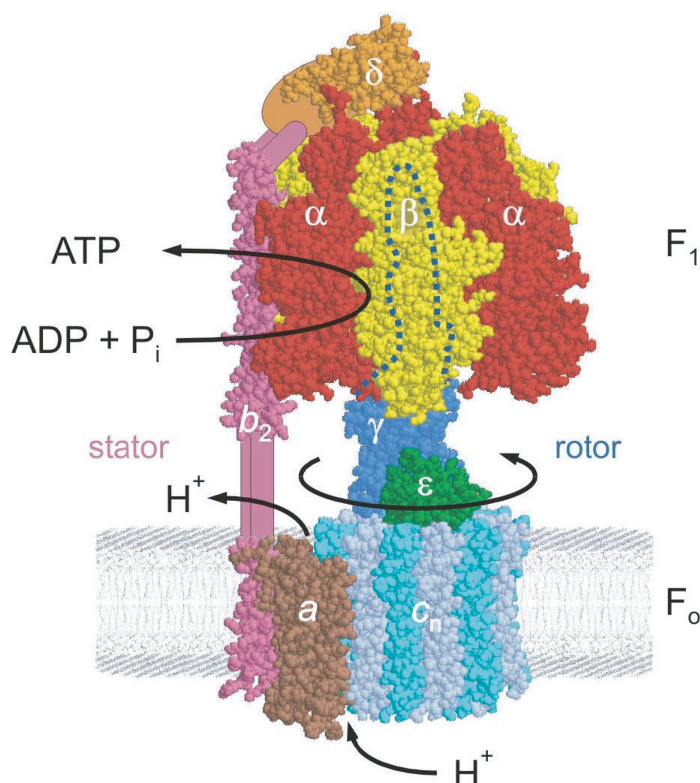
Động cơ phân tử là phần cốt lõi của sự tăng trưởng, sự hoạt động của dây thần kinh và não bộ. Một dây thần kinh chứa một số lớn các động cơ phân tử thuộc 3 loại trên: dynein, myosin và kinesin. Các động cơ này vận chuyển hoá chất, tức 'hàng hoá', dọc theo các sợi trục (axon) và các kết cấu chất/dỡ hàng tại các đầu của chúng. Chúng cần thiết cho sự tăng trưởng của các dây thần kinh, từ cột sống tới đầu ngón chân. Các động cơ khác điều khiển sự tăng trưởng của synapse, giúp ta có ký ức dài hạn. Việc hư hỏng các động cơ phân tử là nguyên nhân sinh ra bệnh Alzheimer, Huntington, đa sơ cứng, ung thư và nhiều bệnh khác bắt nguồn từ các khiếm khuyết di truyền hay do sự nhiễm độc của môi trường.

Xem 8

Tóm lại, không có động cơ phân tử ta không thể di chuyển và suy nghĩ.

Động cơ phân tử quay: ATP synthase

Trong tế bào, nhiên liệu thông thường cho phần lớn các phản ứng hoá học là adenosine triphosphate, hay ATP. Trong thực vật, phần lớn ATP được sản xuất trên màng của các bào



HÌNH 8 Cấu trúc của ATP synthase (© Joachim Weber).

quan được gọi là *chloroplast* và ở tế bào động vật là trong *các ty thể*. Đây là các nhà máy điện trong các tế bào. ATP cũng cung cấp năng lượng cho phần lớn các vi khuẩn. Hoá ra ATP được một protein trong các màng tế bào tổng hợp. Protein này lấy năng lượng từ proton, H^+, nhiên liệu cơ bản của cơ thể người, trong khi ATP là nhiên liệu cao cấp. Phần lớn các động cơ phân tử lấy năng lượng từ ATP. ATP toả ra năng lượng khi nó biến đổi thành adenosine diphosphate, hay ADP. Sự quan trọng của ATP có thể được minh hoạ một cách đơn giản: trong một ngày mỗi người tổng hợp được một lượng ATP gần bằng với khối lượng cơ thể.

Protein tổng hợp ATP được gọi là *ATP synthase*.Đúng ra ATP synthase của các sinh vật có khác nhau; tuy vậy, sự khác nhau rất ít nên trong nhiều trường hợp ta có thể bỏ qua. (Một điểm khác nhau quan trọng là ở chỗ bơm thì ion Na^+ thay cho proton.) Mặc dù ATP synthase là protein khá phức tạp nhưng việc mô tả chức năng của nó cũng dễ dàng: nó hoạt động giống như một *bánh xe cánh quạt* được cung cấp năng lượng nhờ sự chênh lệch mật độ proton hai bên màng tế bào. Hình 8 cho ta thấy cấu trúc và hoạt động của ATP synthase. Nghiên cứu dẫn tới khám phá này đã được giải Nobel Hoá học 1997.

Xem 9

Đúng ra ATP synthase cũng hoạt động theo chiều ngược lại: nếu có độ chênh lệch ATP, nó sẽ bơm proton ra ngoài tế bào. Tóm lại, ATP synthase vừa là một động cơ quay vừa là một bơm phân tử. Nó giống như một động cơ khởi động bằng điện trong các xe ô tô cũ; khi xe đang chạy, động cơ điện là một dynamo sạc điện cho accu. (Trên internet

cũng có nhiều film hoạt hình về hoạt động của ATP synthase.) Người ta đã nghiên cứu ATP synthase khá kỹ. Thí dụ như ta đã biết rằng nó tạo ra 3 phân tử ATP cho mỗi vòng quay, và tạo ra một moment lực khoảng $20kT/2\pi$, trong đó kT là động năng của một phân tử ở nhiệt độ T. Trong cơ thể một người trưởng thành có ít nhất 10^{16} động cơ như vậy. Bánh xe cánh quạt ATP synthase là một trong những viên gạch xây dựng quan trọng của đời sống.

Động cơ quay và sự phá vỡ tính đối xứng

Tại sao tim chúng ta ở bên trái còn gan lại ở bên phải? Câu trả lời của câu hỏi xưa cũ này mới có cách nay vài năm. Sự bất đối xứng trái phải, hay thủ đối tính, của cơ thể người phải được liên hệ với thủ đối tính của phân tử tạo nên sự sống. Trong mọi sinh vật, đường, protein và DNS/DNA là các phân tử có thủ đối tính và trong sinh giới chỉ có một trong 2 loại gương phân tử được sử dụng. Nhưng thiên nhiên đã dịch thủ đối tính của phân tử thành thủ đối tính của cơ thể như thế nào? Câu trả lời chỉ được Hirokawa Nobutaka và cộng sự đưa ra cách nay không lâu; và điều đáng ngạc nhiên là các động cơ phân tử quay là lời giải của câu đố.

Xem 10

Vị trí của nội quan được cố định trong giai đoạn phát triển ban đầu của phôi. Lúc ban đầu, phần chính của phôi, mà ta gọi là *node*, được tiêm mao quay (tức là các lông nhỏ quay được) bao phủ. Ta có thể thấy chúng trong Hình 9. Đúng ra mọi động vật có xương sống đều có một node trong giai đoạn phát triển phôi. Tiêm mao của node được một động cơ phân tử tiếp sức; tất cả đều quay theo chiều kim đồng hồ *giống nhau* khoảng 10 lần mỗi giây. Hướng quay là một hệ quả của thủ đối tính của các phân tử chứa trong các động cơ. Tuy vậy, vì các tiêm mao nghiêng – về phía đuôi của phôi – nên chúng sẽ có tác dụng làm cho chất lỏng chảy trên node hướng về bên trái của phôi. Chất lỏng của *dòng chảy của phôi* mới được khám phá này chứa những chất – NVP – tích luỹ ở bên trái của node và kích khởi các quá trình xác định vị trí của tim. Nếu các tiêm mao không quay do một khiếm khuyết di truyền nào đó hay dòng chảy bị đảo ngược do các tác động bên ngoài, tim và các cơ quan khác sẽ bị lệch chỗ. Mối liên hệ này cũng giải thích cho các hệ quả gây ra do các khiếm khuyết di truyền hay do các can thiệp từ bên ngoài.

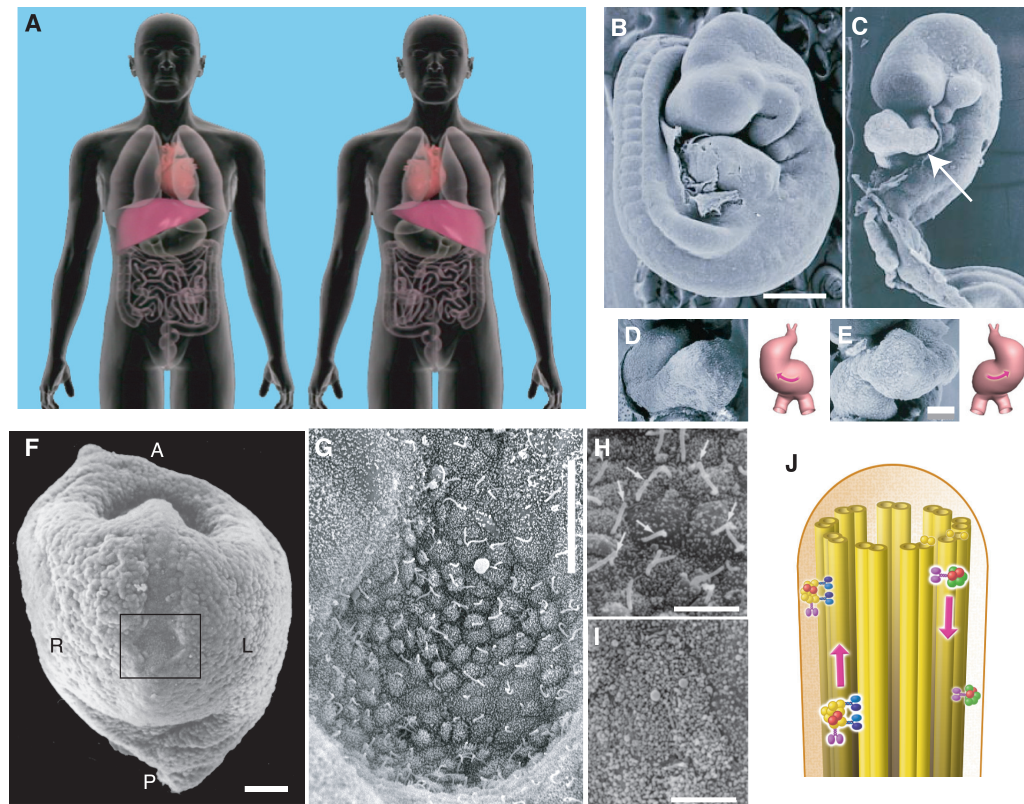
Nói cách khác, qua chuyển động của các tiêm mao và cơ chế đã đề cập, thủ đối tính của các phân tử đã ánh xạ vào thủ đối tính của các động vật có xương sống. Các quá trình tương tự cũng có thể xảy ra ở những nơi khác trong thiên nhiên, thí dụ như trong sự phát triển tính bất đối xứng của não bộ. Đây vẫn còn là một lĩnh vực được nghiên cứu nhiều. Tóm lại, động cơ phân tử thực sự quan trọng đối với sức khoẻ và đời sống của chúng ta.

Các câu đố vui và lạ về sinh học

> Una pelliccia è una pelle che ha cambiato bestia.*
>
> Girolamo Borgogelli Avveduti

Bằng các phương pháp hiển vi hiện đại người ta có thể quay film 3 chiều, sự tiến hoá của một con ruồi từ khi là phôi cho tới khi trở thành một ấu trùng. Một film như vậy cho phép ta theo dõi từng tế bào trong 20 giờ: cách tế bào chuyển động trong khi phát

* '*Bộ lông* là một làn da đã biến thành dã thú.'



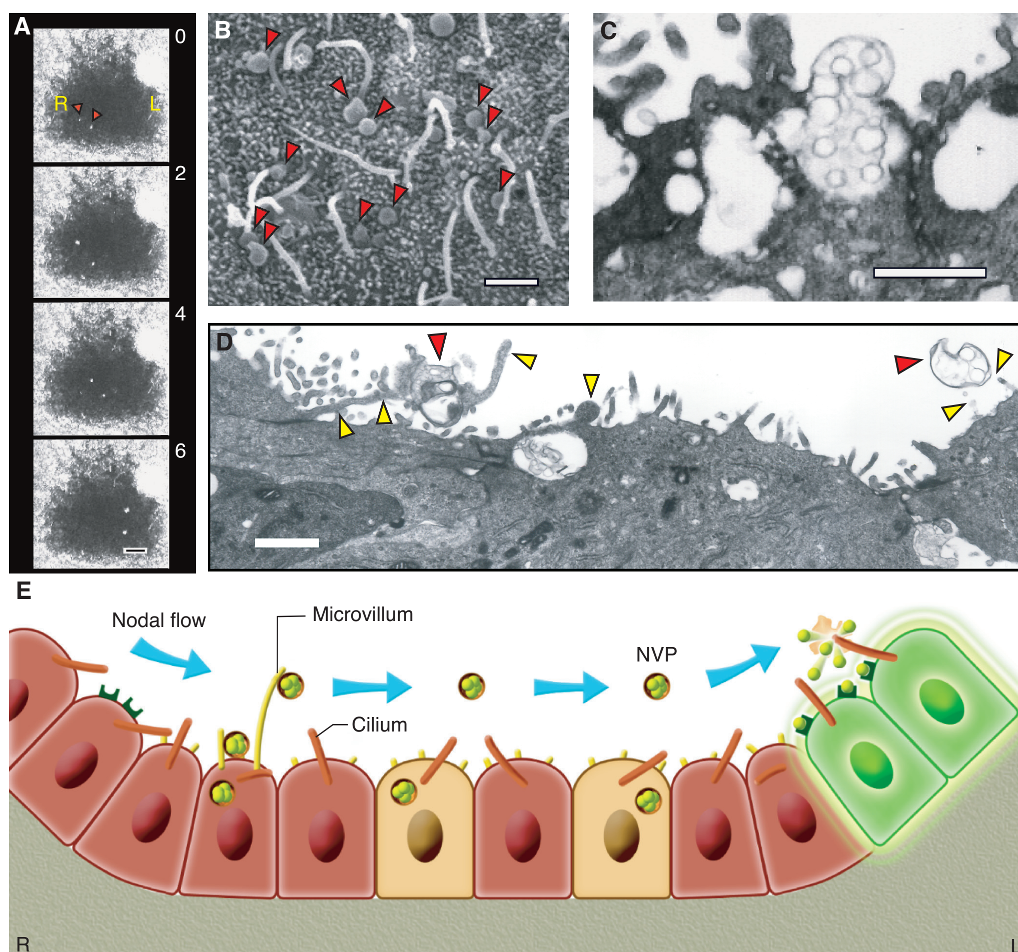
HÌNH 9 A: Sự xếp đặt bất đối xứng của các nội quan trong cơ thể người: Cách thông thường, situs solitus, chiếm đa số, và sự xếp đặt đối xứng gương, situs inversus. Các hình từ B tới E là các vi ảnh của phôi chuột được chụp bằng kính hiển vi điện tử quét. B: Phôi khoẻ mạnh trong giai đoạn này cho thấy một cái đuôi bên phải. C: Trái lại, phôi của thể đột biến với các động cơ tiêm mao còn khiếm khuyết chưa quay được và quai tim bị đảo ngược, nơi có mũi tên chỉ. D: Hình có độ phóng đại lớn hơn và hình biểu diễn một quai tim bình thường. E: Hình tương tự cho thấy một quai tim bị đảo ngược trong một phôi của thể đột biến. Hình từ F tới I là vi ảnh chụp bằng kính hiển vi điện tử quét của một node chuột. F: Hình có độ phóng đại nhỏ của phôi chuột 7.5 ngày nhìn từ phía bụng, với hình vuông chỉ vị trí của node. Hướng được đánh dấu bằng chữ A là phía trước, P là phía sau, L là bên trái và R là bên phải; thanh tỷ lệ là 100 µm. G: Hình node được phóng đại nhiều hơn; thanh tỷ lệ là 20 µm. H: Hình có độ phóng đại lớn hơn nữa của các tiêm mao trên một node khoẻ mạnh, được chỉ ra bằng các mũi tên và hình của các tế bào trong hốc của node; thanh tỷ lệ là 5 µm. I: Các tế bào hốc thuộc phôi của một thể đột biến thiếu tiêm mao. J: Hình minh hoạ sự vận chuyển phân tử trong một tiên mao khoẻ mạnh (© Hirokawa Nobutaka).

triển và phân chia. Hãy xem đoạn film tuyệt vời này, quay ở EMBL, Heidelberg, tại trang youtu.be/MefTPoeVQ3w.

* *

Sự tiến hoá sinh học có thể tóm tắt trong 3 nguyên lý:

1. Mọi sinh vật đều khác nhau – kể cả trong cùng một loài.
2. Mọi sinh vật đều trải qua một cuộc sống khắc nghiệt – bắt nguồn từ sự cạnh tranh.



HÌNH 10 A: Hình ảnh của dòng các vi nang của node (NVPs) được quan sát bằng kính hiển vi quang học. L và R chỉ hướng trái và phải. NVPs, được chỉ bằng các mũi tên, được vận chuyển theo dòng chảy sang trái. Thanh tỷ lệ là 10 μm. B: Vi ảnh của các tế bào hốc của node, nhìn từ phía bụng node, chụp bằng kính hiển vi điện tử quét. Các mũi tên đỏ chỉ vào các tiền thể NVP. Thanh tỷ lệ là 2 μm. C và D: Vi ảnh của các tế bào hốc của node chụp bằng kính hiển vi điện tử truyền qua. Thanh tỷ lệ là 1 μm. E: Hình minh hoạ dòng NVP do các tiêm mao gây ra. Các NVPs thoát ra từ các vi mao linh động, được vận chuyển theo dòng chảy sang trái do các tiêm mao và sau cùng được phân mảnh nhờ các tiêm mao ở biên trái của node. Quầng xanh lục chỉ nơi có nồng độ calcium cao – dấu hiệu kích hoạt tế bào mà kết quả là sự khởi đầu của việc hình thành các cơ quan (© Hirokawa Nobutaka).

3. Sinh vật có lợi thế sẽ tồn tại và sinh sôi, phát triển.

Nguyên lý sau cùng thường được gọi là 'sự sinh tồn của vật thích nghi nhiều nhất'. Ba nguyên lý này dẫn tới việc *các loài và sinh vật có thể thay đổi* qua từng thế hệ. Kết quả của sự thay đổi tích luỹ qua từng thế hệ được gọi là *Sự tiến hoá sinh học*. Đặc biệt, ba nguyên lý này giải thích cho sự thay đổi từ sinh vật đơn bào tới đa bào, từ cá cho tới động vật trên cạn và từ động vật tới loài người.

Các hiệu ứng lượng tử là nền tảng của cả ba nguyên lý tiến hoá. Dĩ nhiên đời sống và

sự biến dưỡng là các hiệu ứng lượng tử. Sự khác nhau được đề cập trong nguyên lý đầu tiên bắt nguồn từ vật lý lượng tử: không thể có các bản sao hoàn hảo của các hệ vĩ mô. Nguyên lý 2 đề cập tới sự cạnh tranh; đó là một loại hiện tượng, mà như ta đã thấy, chỉ có thể bắt nguồn từ sự hiện hữu của lượng tử tác dụng. Nguyên lý 3 đề cập tới sự sinh sản: đó lại là một hiệu ứng lượng tử, dựa trên sự sao chép gene, là các cấu trúc lượng tử. Tóm lại, sự tiến hoá sinh học là một quá trình bắt nguồn từ lượng tử tác dụng.

Quyển IV, trang 123
Quyển IV, trang 20
Trang 18

* *

Làm cách nào để bạn có thể xác định được người nào trong hai người sinh đôi giống hệt nhau là cha của một đứa bé?

Câu đố 8 d

* *

Bạn có thể cho ít nhất 5 lý lẽ để chứng tỏ rằng một người nhân bản vô tính, nếu có, là một người hoàn toàn khác với nguyên bản hay không?

Câu đố 9 s

Con mèo nhân bản vô tính đầu tiên, rất nổi tiếng, *copycat*, sinh năm 2002, trông hoàn toàn khác với 'nguyên bản' (đúng ra là mẹ của nó). Màu và các mảng lông của nó khác hẳn mèo mẹ. Tương tự như vậy, những cặp song sinh giống hệt nhau vẫn có vân tay, mống mắt, mạch máu và những trải nghiệm trong tử cung khác nhau.

Nhiều tính chất của vật hữu nhũ không do gene xác định mà do hoàn cảnh thai nghén, đặc biệt do tử cung và trải nghiệm sinh nở. Tử cung ảnh hưởng đến màu lông, nếp gấp trên da, và cả tính trạng. Ảnh hưởng của trải nghiệm sinh nở lên tính cách đã được nhiều nhà tâm lý học nghiên cứu.

* *

Hãy bàn về luận điểm sau: nếu thiên nhiên có tính cổ điển thay vì lượng tử, thì không chỉ có *hai* giới tính – cũng như sẽ không có một số *rời rạc* giới tính, như trong các động vật lớp thấp – mà sẽ có *một khoảng liên tục* các giới tính. Theo một nghĩa nào đó, sẽ có vô hạn giới tính. Có đúng như vậy không?

Câu đố 10 s

* *

Đây là một câu hỏi nổi tiếng về sự tiến hoá, chưa có câu trả lời: Những hạt *kefir* đầu tiên đã được tạo ra như thế nào? Hạt kefir tạo ra nước kefir khi được ủ với sữa trong khoảng từ 8 tới 12 giờ. Những hạt này gồm có một hỗn hợp cân bằng của khoảng 40 loại vi khuẩn và men. Tất cả các hạt kefir trên thế giới đều có liên hệ với nhau. Nhưng cách nay khoảng 1000 năm các hạt đầu tiên đã được tạo ra như thế nào?

Câu đố 11 r

* *

Động cơ phân tử rất mạnh. Động cơ phân tử trong chim hải âu đen (*Puffinus griseus*), một con chim dài 45 cm, cho phép nó bay 74 000 km một năm, với một kỷ lục đã được ghi nhận là 1094 km một ngày.

* *

Khi các động cơ tiêm mao làm sạch lỗ mũi bị xáo trộn, không thể hoạt động, chúng gởi đi một tín hiệu mệt mỏi. Khi có nhiều tín hiệu như vậy được gởi đi, cơ thể sẽ kích khởi một phản ứng hắt hơi. Hắt hơi là một phản ứng đối với các động cơ phân tử bị khoá.

* *

Sự tăng trưởng của phôi người là một trong các kỳ quan của thế giới. Website embryo.soad.umich.edu cung cấp rất nhiều dữ liệu, hình ảnh, hoạt hình và ảnh cộng hưởng từ về quá trình tăng trưởng này.

* *

Câu đố 12 s Chim có rốn không?

* *

Mọi động vật có khả năng tái tạo từ một mảnh nhỏ, như *con sán*, sẽ sinh sản vô tính bằng cách phân chia. Mọi động vật sinh sản hữu tính không thể tái tạo toàn bộ thân thể từ một mảnh nhỏ.

* *

Câu đố 13 s Mọi động vật di chuyển bằng chân thì có tính đối xứng trái-phải. Tại sao?

* *

Nhiều phân tử tìm thấy trong sinh vật, như đường, có phân tử đối xứng gương. Tuy vậy, trong mọi sinh vật ta chỉ tìm thấy một trong hai loại. Thực ra đời sống có tính bất đối
Câu đố 14 s xứng. Tính bất đối xứng có được bằng cách nào?

* *

Tại sao sự khác nhau về mặt di truyền giữa người và hắc tinh tinh thường là khoảng 1 %, trong khi sự khác nhau giữa nam và nữ là một nhiễm sắc thể trong số 46, tức là khoảng
Câu đố 15 s 2.2 %?

* *

Thời gian dài nhất mà một vi khuẩn có thể tồn tại là bao nhiêu? Thời gian đó là hơn 5000 năm đối với vi khuẩn được tìm thấy trong các xác ướp Ai Cập. Trong nhiều năm,
Xem 11 người ta đã ước tính thời gian sinh tồn của các bào tử vi khuẩn được phục sinh từ ruột của côn trùng được bao trong hổ phách là trên 25 triệu năm. Và người ta cho rằng trên 250 triệu năm là thời gian mà vi khuẩn đã được Heinz Dombrowski khám phá trong thập niên 1960 trong các lớp muối trầm tích (có độ phóng xạ thấp) ở Fulda, Đức, đã ngủ đông trước khi được đánh thức trong phòng thí nghiệm. Một kết quả tương tự cũng vừa được công bố từ sự khám phá một loại vi khuẩn khác ở lớp muối trầm tích Bắc Mỹ trong
Xem 12 thành hệ Salado.

Tuy vậy, các kết quả này chưa được sự nhất trí, vì sự giải trình tự DNA đã cho thấy rằng các vi khuẩn này có thể bắt nguồn từ sự nhiễm bẩn các mẫu trong phòng thí nghiệm chứ
Xem 13 không phải là một phần của nguyên mẫu. Vì vậy câu hỏi về thời gian sinh tồn dài nhất của vi khuẩn vẫn còn để mở.

* *

Năm 1967, một camera TV đã được đặt trên Mặt trăng. Không ai biết là nó có chứa một đám nhỏ *Streptococcus mitis*. Ba năm sau, camera được mang về Trái đất. Vi khuẩn vẫn còn sống. Chúng đã tồn tại trong 3 năm không thức ăn, nước uống và không khí. Sự sống thật bền bỉ. Câu chuyện được lan truyền rộng rãi này khó tin đến nỗi nó đã được

BẢNG 2 Số lượng gần đúng của các loài sinh vật.

Nhóm sinh vật	Số loài được mô tả	Số loài được ước tính	
		min.	max.
Virus	$4 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^6$
Sinh vật nhân sơ (‘vi khuẩn’)	$4 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^6$
Nấm	$72 \cdot 10^3$	$200 \cdot 10^3$	$2.7 \cdot 10^6$
Nguyên sinh động vật	$40 \cdot 10^3$	$60 \cdot 10^3$	$200 \cdot 10^3$
Tảo	$40 \cdot 10^3$	$150 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^6$
Thực vật	$270 \cdot 10^3$	$300 \cdot 10^3$	$500 \cdot 10^3$
Giun tròn	$25 \cdot 10^3$	$100 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^6$
Giáp xác	$40 \cdot 10^3$	$75 \cdot 10^3$	$200 \cdot 10^3$
Lớp hình nhện	$75 \cdot 10^3$	$300 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^6$
Côn trùng	$950 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^6$	$100 \cdot 10^6$
Nhuyễn thể	$70 \cdot 10^3$	$100 \cdot 10^3$	$200 \cdot 10^3$
Động vật có xương sống	$45 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	$55 \cdot 10^3$
Loài khác	$115 \cdot 10^3$	$200 \cdot 10^3$	$800 \cdot 10^3$
Tổng cộng	$\mathbf{1.75 \cdot 10^6}$	$\mathbf{3.6 \cdot 10^6}$	$\mathbf{112 \cdot 10^6}$

Xem 15 kiểm tra lại vào năm 2011. Kết luận: câu chuyện không đúng; do lầm lẫn, vi khuẩn lọt vào phòng thí nghiệm sau khi camera được đem trở về.

* *

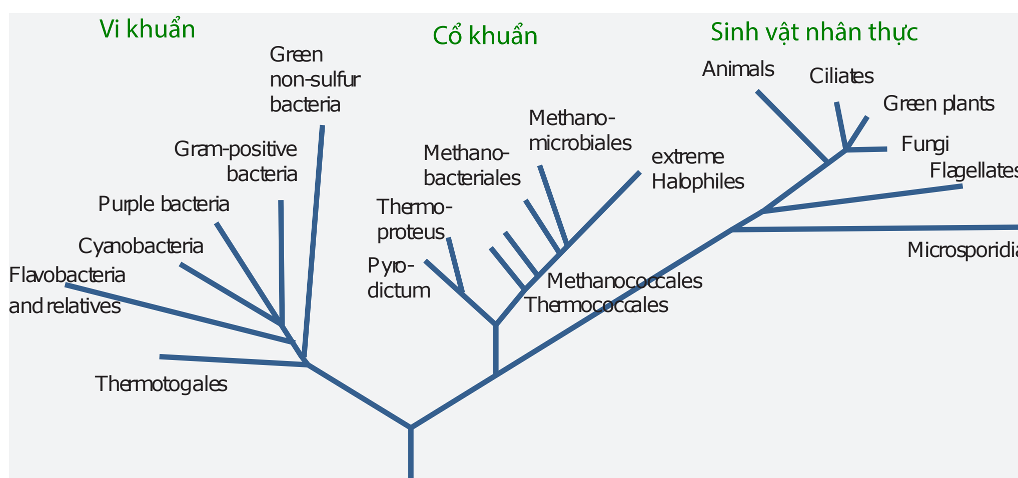
Trong Sinh học, sự phân loại cực kỳ hữu dụng. (Điều này tương tự tình trạng trong Vật lý thiên văn nhưng hoàn toàn tương phản với tình trạng trong Vật lý.) Bảng 2 cho một Xem 16 Tổng quan về tầm cỡ công việc. Kho vật liệu này có thể tóm tắt trong một sơ đồ như trong Hình 11. Một số công trình nghiên cứu mới hình như có đề nghị một số thay đổi nhỏ trong hình. Tuy vậy cho tới bây giờ thì cây chỉ có một gốc.

* *

Cơ sinh ra chuyển động thông qua các kích thích điện. Có một hệ kỹ thuật nào làm được như vậy không? Ứng viên đang lộ diện: *polymer điện hoạt* thay đổi hình dạng khi chúng bị một dòng điện hay hoá chất kích thích. Chúng nhẹ cân, không ồn và dễ sản xuất. Tuy vậy, cuộc thi vật tay đầu tiên giữa người và cơ nhân tạo, được tổ chức năm 2005, thì người thắng là một thiếu nữ. Cuộc đua tài vẫn còn tiếp diễn.

* *

Sự sống không phải là một khái niệm được định nghĩa một cách rõ ràng. Định nghĩa đề cập ở trên, khả năng tự sinh sản, có phần hạn chế của nó. Có thể áp dụng định nghĩa cho động vật già, bàn tay bị cắt rời, tinh trùng, trứng hay động vật hữu nhũ ở giai đoạn phôi hay không? Định nghĩa của sự sống cũng có vấn đề khi áp dụng cho đơn bào. Bạn có thể tìm ra một định nghĩa tốt hơn không? Định nghĩa sinh vật là ‘vật được tạo thành Câu đố 16 e từ tế bào’ có hữu dụng không?



HÌNH 11 Một phiên bản mới của cây tiến hoá.

* *

Mỗi thí dụ về sự tăng trưởng là một loại chuyển động. Một số thí dụ cực kỳ phức tạp. Hãy lấy trường hợp tăng trưởng của mụn trứng cá. Nó đòi hỏi phải thiếu kẽm, một hệ miễn dịch yếu, nhiều vi khuẩn, cũng như có sự trợ giúp của *Demodex brevis*, một con ve (côn trùng nhỏ) sống trong các lỗ nhỏ trên da. Với kích thước 0.3 mm, nhỏ hơn dấu chấm ở cuối câu này một chút, con ve này và các sinh vật khác sống trên mặt người có thể thấy được nhờ một kính lúp có độ phóng đại lớn.

* *

Con người mang theo nhiều sinh vật. Con người cần vi khuẩn để sống. Có khoảng 90 % vi khuẩn trong miệng người chưa được biết rõ; đến nay người ta chỉ mới cô lập được khoảng 1000 loài.

Vi khuẩn rất quan trọng trong đời sống của chúng ta: chúng giúp ta tiêu hoá, chống Xem 17 lại bệnh tật do các vi khuẩn nguy hiểm gây ra. Đúng ra số vi khuẩn trong cơ thể người được ước tính là $3.8(2.0) * 10^{13}$, trong đó hơn 99 % ở trong ruột. Số tế bào trong cơ thể một người trưởng thành, trung bình là $3.0(0.3) * 10^{13}$ – trong đó có từ 70 tới 85 % là hồng huyết cầu. Tóm lại, cơ thể người chứa nhiều vi khuẩn hơn tế bào! Tuy vậy, khối lượng của tất cả vi khuẩn trong người chỉ vào khoảng 0.2 kg, vì vi khuẩn ở ruột nhỏ hơn tế bào của người rất nhiều.

Có khoảng 100 nhóm vi khuẩn trong thiên nhiên, cơ thể người chủ yếu chứa vi khuẩn của 4 nhóm: actinobacteria, bacteroidetes, firmicutes và proteobacteria. Chúng có vai trò quan trọng trong chứng béo phì, sự suy dinh dưỡng, bệnh tim, bệnh tiểu đường, đa sơ cứng, chứng tự kỷ và các chứng khác.

* *

Cây tăng trưởng như thế nào? Khi một cái cây – theo ngôn ngữ sinh học là *monopodal phanerophyte* – tăng trưởng và ra lá, có từ 40 % tới 60 % khối lượng của nó, cụ thể là nước và muối khoáng, phải lấy từ dưới đất lên. (Phần khối lượng còn lại đến từ CO_2 trong không khí.) Điều này xảy ra như thế nào? Vật liệu được hút lên nhờ các cột nước

trong cây; lực hút bắt nguồn từ áp suất âm do nước ở đỉnh cột bay hơi tạo ra. Người ta gọi điều này là *mô hình thoát hơi nước-cố kết-lực căng*. (Kết luận này là kết quả của nhiều thí nghiệm.) Nói cách khác, cây bơm vật liệu lên cao mà không cần năng lượng.

Cây không cần năng lượng để vận chuyển nước. Kết quả là một cái cây tăng trưởng chỉ nhờ vào sự thêm vật liệu vào bề mặt của nó. Điều này hàm ý rằng khi một cái cây tăng trưởng, nhánh cây được tạo thành ở một độ cao nào đó thì cũng được thấy ở *cùng* độ cao đó trong phần đời còn lại của cây. Chỉ cần kiểm tra điều này bằng các cây có trong vườn của bạn. Câu đố 17 e

* *

Câu đố 18 d Động vật hữu nhũ có khoảng nhiệt độ vận hành hẹp. Khác với máy móc, con người chỉ hoạt động khi thân nhiệt nằm trong một khoảng hẹp. Tại sao? Và yêu cầu này có áp dụng cho sinh vật ngoài Trái đất, nếu chúng hiện hữu, hay không?

* *

Câu đố 19 r Tế bào đầu tiên đã xuất hiện như thế nào? Câu hỏi quan trọng này vẫn chưa có câu trả lời. Trong nỗ lực tìm kiếm câu trả lời, các nhà nghiên cứu đã tìm thấy nhiều chất trong nước đã tự hình thành các màng bao bọc. Những chất như vậy cũng tạo thành các bọt. Có thể sự sống đã hình thành trong các bọt như vậy. Người ta đã bàn đến các khả năng khác như sự sống hình thành dưới nước, ở nơi có magma phun vào đại dương. Việc làm sáng tỏ nguồn gốc tế bào là một trong những câu đố mở quan trọng nhất trong Sinh học – mặc dù câu trả lời có thể không hữu dụng cho lắm.

* *

Câu đố 20 s Sự sống có thể đến Trái đất từ vũ trụ không?

* *

Có sự sống ở nơi nào khác trong vũ trụ không? Câu trả lời cũng rõ ràng. Trước hết, *có thể có* sự sống ở nơi khác, mặc dù xác suất vô cùng nhỏ, do vấn đề thời gian phải dài và các yêu cầu về một hệ sao ổn định, một hệ hành tinh ổn định và một hệ địa chất ổn định. Cũng cần nói thêm, tính cho đến nay, mọi khẳng định đã tìm ra sự sống ở nơi khác đều là *ba xạo*. Không phải sai lầm mà là giả dối thực sự. Sự huyễn ảo của một sự sống bên ngoài Trái đất đã đặt ra cho mọi người một bài toán thú vị: tại sao sự sống ngoài Trái đất lại làm bạn hứng thú đến như vậy? Nếu bạn có câu trả lời, hãy thực hiện *ngay* điều bạn mong ước. Nếu không bạn hãy làm việc khác. Câu đố 21 e

* *

Trị liệu tổng thể có ý nghĩa gì đối với khoa học gia, có phải là để tránh các tín điều vô nghĩa và sai lạc không? Trị liệu tổng thể có nghĩa là điều trị theo cách nhìn con người là một tổng thể. Phương pháp này dẫn tới 4 lĩnh vực:
— trợ giúp *vật lý*, trợ giúp các quá trình chữa trị cơ hay nhiệt trong cơ thể;
— trợ giúp *hoá học*, bằng dưỡng chất hay vitamin;
— trợ giúp *tín hiệu*, bằng các phương tiện điện hoá, để trợ giúp cho các hệ phát tín hiệu của cơ thể;
— trợ giúp *tâm lý*, giúp cho tất cả các quá trình trên.

Khi tất cả các phương diện này được quan tâm chăm sóc, sự chữa trị sẽ nhanh chóng và

đầy đủ nhất. Tuy vậy, vẫn còn một quy luật chính: *medicus curat, natura sanat*.*

* *

Cuộc đời chủ yếu là vẻ đẹp. Thí dụ như cuốn sách của Claire Nouvian, *The Deep: The Extraordinary Creatures of the Abyss*, có tại www.press.uchicago.edu/books/nouvian/index.html cho phép ta thưởng ngoạn vẻ đẹp của cuộc sống sâu thẳm dưới đại dương.

* *

Sự ô nhiễm môi trường ảnh hưởng như thế nào tới đời sống? Việc trả lời cho câu hỏi này là cả một lĩnh vực nghiên cứu hiện đại rất sôi nổi. Dưới đây là một số câu chuyện nổi tiếng.

— Thuốc diệt cỏ và nhiều sinh vật biến đổi gen giết chết ong. Vì lý do này, ong ở Mỹ đang chết (từ năm 2007); hậu quả là các vụ thu hoạch – như quả hạnh và cam – bị thất bát. Trong những quốc gia mà thuốc diệt cỏ và thực vật biến đổi gen bị cấm, ong vẫn an toàn. Một thí dụ nữa ở Pháp, nơi không có ong thì ngành công nghiệp rượu vang có nguy cơ bị thiệt hại.
— Sự ô nhiễm hoá chất sẽ làm phát sinh các trẻ em dị dạng. Ở Trung quốc, một trong 16 trẻ em bị dị dạng vì lý do này (năm 2007). Ở Nhật, sự dị dạng đã giảm nhiều – dù không hoàn toàn – kể từ khi các đạo luật khắt khe về việc chống ô nhiễm được ban hành.
— Ô nhiễm phóng xạ có thể gây ra tử vong. Ở Nga, tại hồ Karachay nổi tiếng đã bị lấp Trang 195 một phần bằng bê tông vì độ phóng xạ cao của nó có thể làm người đi bộ bên hồ tử vong trong vòng một giờ.
— Thuốc lá cũng là kẻ sát nhân – dù chậm. Các quốc gia ít tiêu thụ thuốc lá hay hạn chế sự hút thuốc đã làm giảm tỷ lệ bệnh ung thư và các bệnh khác.
— Ăn cá hồi có hại cho sức khoẻ của bạn vì kim loại nặng có trong cá.
— Cây li-e đang biến mất. Ngành công nghiệp rượu vang đã bắt đầu các chương trình nghiên cứu lớn để đối phó với vấn đề này.
— Gan của các động vật sống ở Bắc và Nam cực chứa đầy độc chất hoá học do con người tạo ra.
— Việc đốt các nhiên liệu hoá thạch làm tăng mức CO_2 trong khí quyển. Điều này kéo theo nhiều hậu quả đối với khí hậu của Trái đất, bao gồm việc tăng chậm nhiệt độ trung bình của Trái đất và mực nước biển.

Các nghiên cứu về sinh thái đã phát hiện thêm nhiều vấn đề. Chúng ta hy vọng rằng nhận thức về các vấn đề này sẽ được nâng cao trên toàn thế giới.

* *

Một số nhà nghiên cứu thích định nghĩa sinh vật là các hệ *tự sinh sản được*, người khác thì thích định nghĩa sinh vật là những hệ *có biến dưỡng*. Mike Russell và Eric Smith đề nghị định nghĩa sau đây: '*Mục đích của sự sống là hydrogen hoá carbon dioxide.*' Nói cách

* 'Bác sĩ giúp đỡ nhưng thiên nhiên mới chữa trị.'

khác, mục tiêu của cuộc sống là thực hiện phản ứng



$$CO_2 + 4\,H_2 \rightarrow CH_4 + 2\,H_2O\ . \qquad (1)$$

Mô tả khô khan nhưng đẹp đẽ này đáng cho ta nghiền ngẫm – và nhiều nhà nghiên cứu đang nghiêm túc tìm hiểu các hệ quả của quan niệm này.

* *

Không những cái chết mà cả sự lão hoá cũng là quá trình lượng tử. Các cuộc nghiên cứu đi sâu vào lĩnh vực rộng lớn này đang diễn ra. Thí dụ như sự rụng lá vào mùa thu. Hiện tượng này được ethene, một chất khí đơn giản, kích khởi. Bạn có thể làm cho lá rụng, bằng cách đặt một cành Táo – một nguồn ethene mạnh – cùng với một nhánh Hồng trong một bao nhựa: các cành Hồng sẽ rụng lá.

* *

Việc hồi sinh những người mà tim và phổi đã ngưng hoạt động là một chuỗi các chuyển động hữu ích được gọi là *sự phục hồi chức năng tim phổi*. Hãy tìm hiểu điều này.

* *

Các công trình nghiên cứu mới đã chứng tỏ rằng chuyển động rất quan trọng cho việc giữ gìn sức khoẻ. Đặc biệt, chơi thể thao đã là quan trọng nhưng giảm thời gian ngồi không còn quan trọng hơn. Người nào ngồi nhiều giờ mỗi ngày đều có nguy cơ bị tiểu đường, ung thư vú, giảm chất trắng trong não, chứng mất trí và các bệnh khác. Việc nghiên cứu các tác hại của việc ngồi nhiều chỉ mới bắt đầu. Kết quả nghiên cứu cho thấy ngồi trước TV, PC hay trong xe nhiều giờ mỗi ngày *không thể* bù đắp lại bằng việc chơi thể thao.

* *

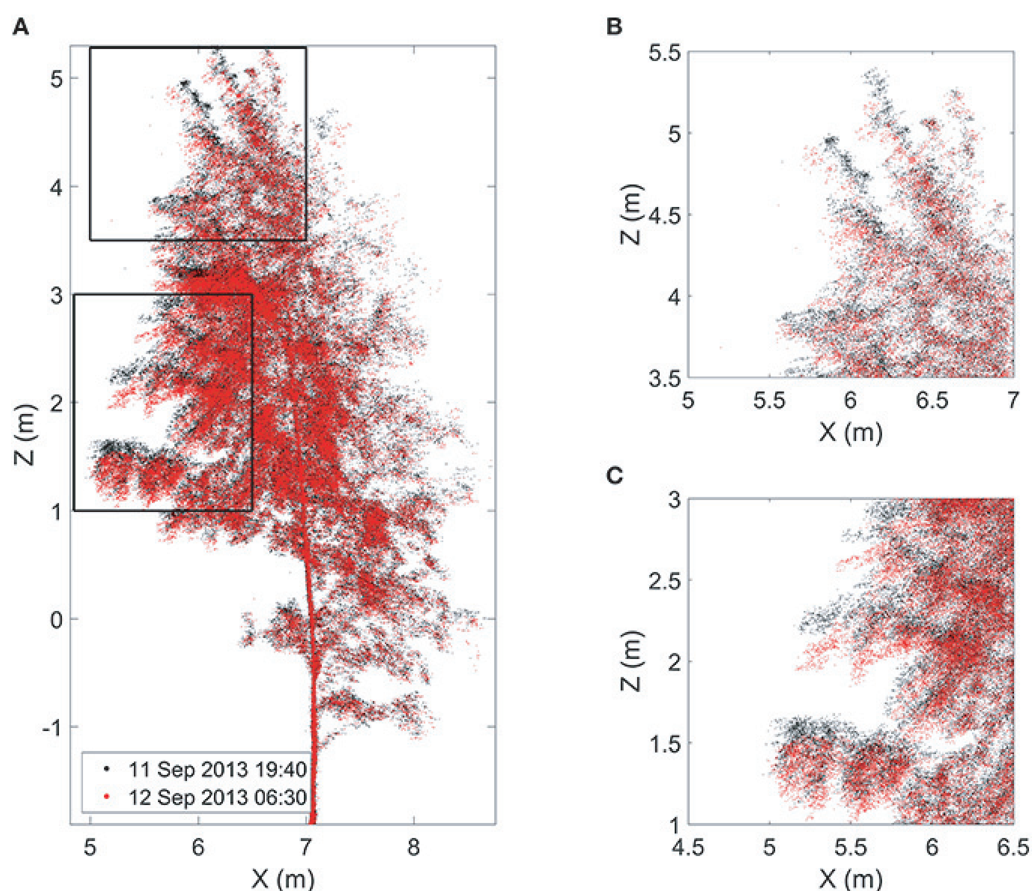
Để sống khoẻ và bảo đảm luôn khoẻ mạnh, hãy tận hưởng cuộc đời và thưởng thức các quyển sách của Mark Verstegen.

* *

Loài sinh vật nào thành công nhất, nếu ta đo độ thành công bằng sinh khối của loài? Câu hỏi đơn giản này không có câu trả lời. Giữa các động vật, gia súc (*Bos taurus*), người (*Homo sapiens*) và loài nhuyễn thể ở Nam cực (*Euphasia superba*) có sinh khối như nhau nhưng ta chưa rõ đây có phải là giá trị lớn nhất hay chưa. Không có dữ liệu đầy đủ về thực vật – trừ số liệu thu hoạch. Có phần chắc là nhiều loài vi khuẩn, như *Prochlorococcus* ở biển hay một số loài vi khuẩn tìm thấy trong đất và nhiều loài nấm có sinh khối cao hơn nhiều. Nhưng chưa có một tổng quan nào đáng tin cậy.

* *

Cây chuyển động theo nhiều cách thú vị. Thí dụ, nó tranh giành với cây lân cận về không gian, ánh sáng và dưỡng chất. Việc này xảy ra dữ dội nhất nếu hàng xóm là một loài khác. Nhiều cây không thích các cây khác chạm vào nó – nhưng cũng có ngoại lệ, như cây sồi. Khi cây sồi ‘đánh nhau’ với cây sồi Quercus, sau vài năm, Quercus chỉ còn lại một ít không gian và ánh sáng vì cây sồi đã chiếm gần hết. Nhưng cây cối cũng giúp đỡ hàng



HÌNH 12 Vị trí cành và lá của một cây phong vào cuối ngày (màu đen) và lúc sáng sớm (màu đỏ), với phần phóng đại nằm trong các hình bên phải (© Eetu Puttonen et al.).

xóm trong trường hợp bệnh hoạn bằng cách cung cấp dưỡng chất và nước. Nhiều chuyện hấp dẫn khác về cây cối – bao gồm cách liên lạc thông qua các tín hiệu hoá học trong không khí như ethylene (ethene) – đã được Peter Wohlleben, kể lại trong quyển *Das geheime Leben der Bäume: Was sie fühlen, wie sie kommunizieren – die Entdeckung einer verborgenen Welt*, Ludwig Verlag, 2015.

* *

Cây ngủ vào ban đêm và thức giấc vào buổi sáng. Điều này đã được biết từ nhiều thế kỷ qua; một thí nghiệm đẹp mắt của hiệu ứng này đã được Eetu Puttonen và cộng sự thực hiện bằng cách sử dụng máy quét laser. Kết quả được trình bày trong Hình 12, cho thấy chiều cao của cành và lá phong trong buổi sáng sớm thì thấp hơn lúc ban ngày 10 cm. Thí nghiệm cũng chứng tỏ rằng cây chuyển động nhiều nhất vào lúc sáng sớm, khi nó thức dậy. Nguồn gốc của các hiệu ứng này hình như là do sự khác biệt của việc hút nước vào lúc ban ngày và ban đêm.

Xem 18

Vật lý của niềm hoan lạc

> “Trí tuệ có là gì ngoài sự chuyển động trong một hình cầu tri thức?”
> Oscar Wilde, *The Critic as Artist*.

Sự hỷ lạc là một hiệu ứng lượng tử. Lý do cũng đơn giản. Hỷ lạc đến từ cảm giác. Mọi cảm giác đều đo được. Và mọi số đo đều dựa trên Thuyết lượng tử.

Cơ thể người, giống một chiếc xe đắt tiền, gắn đầy cảm biến. Sự tiến hoá đã tạo nên các cảm biến có khả năng khởi phát các cảm giác hoan lạc khi ta sử dụng cơ thể vào mục đích mà nó được tạo ra. Dĩ nhiên không nhà nghiên cứu nào thừa nhận là mình đang nghiên cứu về sự hỷ lạc. Họ sẽ nói rằng mình nghiên cứu về cảm giác và *sự nhận thức*. Nhưng sự hỷ lạc và các cảm biến giúp ta duy trì sự sống. Niềm hoan lạc sẽ lên tột đỉnh khi sự sống được giữ cho liên tục. Trong quá khứ, sự xuất hiện của một cảm biến mới trong sinh hệ luôn luôn có ảnh hưởng quan trọng đến sự tiến hoá, như trong sự kiện bùng nổ ở kỷ Cambri.

Nghiên cứu về sự hỷ lạc và các cảm biến sinh học là một lĩnh vực hấp dẫn và vẫn còn tiếp diễn; ở đây ta chỉ điểm qua các điều đã biết.

Tai rất nhạy đồng thời chịu được các tín hiệu rất mạnh. Không một cảm biến âm nào có thể bao trùm trên một dải năng lượng rộng 10^{13}; thật vậy, dải cường độ âm có thể phát hiện được kéo dài từ 1 pW/m^2 (có người nói là 50 pW/m^2) tới 10 W/m^2, tương đương với áp suất không khí thay đổi từ 20 μPa tới 60 Pa. Cường độ thấp nhất mà tai nghe được là của một nguồn âm 20 W cách xa tai 10 000 km, nếu âm không mất đi trong khoảng cách đó. Bước sóng của âm nghe được trải dài từ 17 m (tần số 20 Hz) tới 17 mm (tần số 20 kHz). Trong phạm vi này, tai với từ 16 000 tới 20 000 tế bào lông tơ và 30 000 neuron ốc tai, có thể phân biệt được ít nhất 1500 cao độ. Nhưng nó còn có thể phân biệt được các tần số gần bằng nhau, như 400 và 401 Hz, bằng cách sử dụng một cơ chế đặc biệt để làm sắc cao độ.

Mắt là một máy phát hiện photon phụ thuộc vào vị trí. Mỗi mắt chứa khoảng 126 triệu đầu dò riêng biệt trên võng mạc. Mật độ khối của đầu dò đã giúp cho mắt có thị lực lớn nhất với đường kính của thuỷ tinh thể đã có. Chúng cho mắt có năng suất phân giải là $1'$, hay 0.29 mrad và khả năng nhận biết tới 60 photon *tới* trong 0.15 s hay 4 photon *bị hấp thu* trong cùng một khoảng thời gian.

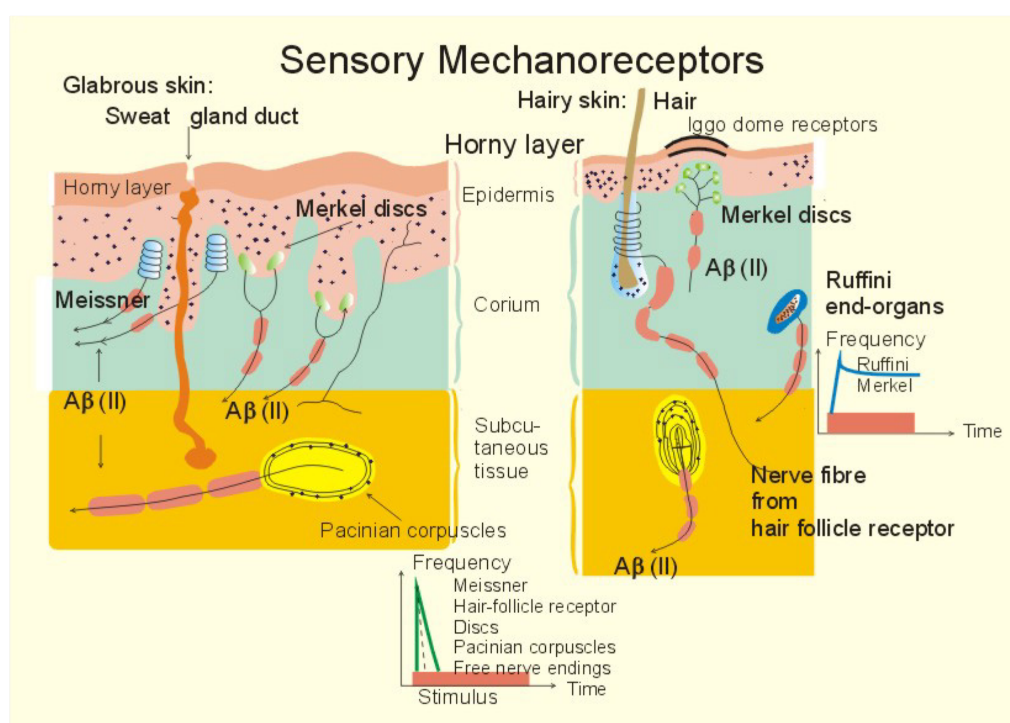
Mỗi mắt chứa 120 triệu *tế bào hình que* là các đầu dò cường độ ánh sáng cực nhạy. Chúng giúp cho mắt có độ nhạy cao. Tế bào hình que không phân biệt được màu sắc. Trước thế kỷ 21, con người đã tạo ra được các cảm biến ánh sáng có độ nhạy như tế bào hình que, phải được làm lạnh bằng helium vì công nghệ chưa tạo được các cảm biến ở nhiệt độ phòng nhạy như mắt người.

Mắt người chứa khoảng 6 triệu *tế bào hình nón* là các đầu dò màu sắc không quá nhạy, có sự phân bố như ta đã thấy trước kia. Các hoá chất khác nhau trong 3 loại tế bào hình
Quyển III, trang 198 nón (đỏ, lục, lam) làm cho các cảm biến có tốc độ khác nhau; điều này có thể kiểm tra
Xem 19 bằng một phép thử đơn giản như ta thấy trong Hình 13. Sự khác nhau về độ nhạy giữa tế bào hình nón (phát hiện màu) và tế bào hình que (khuyết sắc) là lý do vào ban đêm mọi con mèo đều màu xám.

Hình ảnh do mắt thu được chỉ sắc nét khi mắt thường xuyên chuyển động nhẹ một cách ngẫu nhiên. Nếu chuyển động này ngưng lại, thí dụ như do hoá chất nào đó, hình



HÌNH 13 Tốc độ khác nhau của của các cảm biến màu (tế bào hình nón) dẫn tới một hiệu ứng kỳ lạ là hình này (trong ấn bản màu) lắc nhẹ từ phải sang trái trong ánh sáng yếu.



HÌNH 14 Năm cảm biến về xúc giác của người, từ thông dụng tới ít thông dụng nhất: tiểu thể Meissner, tế bào Merkel, tiểu thể Ruffini, tiểu thể Pacini và thụ thể lông.

ảnh sẽ bị nhoè đi.

Mắt cũng chứa khoảng 1 triệu hạch thần kinh võng mạc. Mọi tín hiệu từ mắt được truyền qua 1 triệu dây thần kinh thị giác tới vỏ não chứa trên 500 triệu tế bào.

Các cảm biến xúc giác được phân bố trên da, với mật độ mặt thay đổi từ vùng này qua vùng khác. Mật độ ở trên lưng thấp nhất và ở trên mặt và lưỡi thì cao nhất. Bàn tay có khoảng 17 000 thụ thể xúc giác, phần lớn ở đầu ngón tay. Có những cảm biến riêng dành cho sự chạm nhẹ (tiểu thể Meissner) và áp suất (tế bào Merkel), dành cho sự biến

dạng (tiểu thể Ruffini), sự rung động (tiểu thể Pacinian) và cho cảm giác ngứa (các sợi không bao myelin); cũng có các cảm biến nóng, lạnh và đau.*

Một số cảm biến có dạng tổng quát như trong Hình 14, có phản ứng tỷ lệ với cường độ kích thích; một số lại phản ứng với sự biến đổi, chỉ cho tín hiệu khi kích thích thay đổi. Nhiều cảm biến ở đây cũng được tìm thấy trong cơ thể – thí dụ như trên lưỡi. Các cảm biến được kích khởi khi áp suất bên ngoài làm cho chúng bị biến dạng; điều này dẫn tới việc giải phóng các ion Na^+ và K^+ xuyên qua màng của chúng, làm phát sinh một tín hiệu điện gởi tới dây thần kinh dẫn lên não.

Cơ thể người cũng chứa các *cảm biến định hướng* trong tai, *cảm biến giãn* trong cơ và *cảm biến đau* phân bố với mật độ khác nhau trên da và trong cơ thể.

Người ta chỉ mới biết một phần về cơ chế của các *cảm biến vị giác* của lưỡi. Lưỡi có thể tạo ra 6 tín hiệu vị giác** – ngọt, mặn, đắng, chua, đạm và béo – mà cơ chế chỉ mới được làm sáng tỏ lúc gần đây. Cảm giác về chất đạm còn gọi là *vị ngọt của thịt*, đã được
Xem 20
Ikeda Kikunae khám phá năm 1907; cảm giác ‘béo’ chỉ được khám phá vào năm 2005. Lưỡi, vòm miệng và trong má có khoảng 10 000 gai vị giác, 90 % trong số đó ở trên lưỡi. Mỗi gai có từ 50 tới 150 thụ thể có đường kính khoảng 10 µm.

Vào thời cổ Hy Lạp, Democritus đã tưởng tượng rằng vị giác phụ thuộc vào hình dạng của nguyên tử. Ngày nay ta biết rằng vị ngọt có liên quan tới hình dạng của phân tử. Hiện nay người ta vẫn chưa hiểu rõ về các thụ thể vị giác khác nhau trên lưỡi. Người ta đã biết có ít nhất 3 thụ thể ngọt khác nhau, hàng tá các thụ thể đắng, một thụ thể đạm và một thụ thể béo. Ngược lại, vị giác chua và mặn bắt nguồn từ các kênh ion. Dù đã biết khá nhiều về vị giác nhưng người ta vẫn chưa tạo ra được cảm biến có khả năng phân biệt giống như lưỡi. Cảm biến vị giác hoàn thiện sẽ có giá trị thương mại rất lớn đối với kỹ nghệ thực phẩm.Người ta vẫn tiếp tục nghiên cứu để tìm ra các chất ngăn chặn các thụ thể vị giác, mục đích là làm giảm vị đắng của thuốc và thức ăn.

Mũi có khoảng 350 loại thụ thể mùi khác nhau với tổng số khoảng 40 triệu tế bào thụ thể. (Chó có nhiều hơn 25 lần.) Dựa vào các tổ hợp khả hữu người ta ước tính mũi có thể phát hiện khoảng 10 000 mùi khác nhau. *** Cùng với 6 tín hiệu của lưỡi, mũi cũng tạo ra một số lớn các vị giác. Điều này giúp ta chống lại các chất độc hoá học như khói và chất độc sinh học như phân. Ngược lại, các cảm biến hơi nhân tạo chỉ phát hiện được một số ít hơi. Các cảm biến vị giác và khứu giác hoàn thiện cho ta khả năng đánh giá rượu vang, phô mai trong khi sản xuất và sẽ mang lại lợi nhuận khổng lồ cho người phát
Câu đố 23 ny
minh ra nó. Hiện nay với công nghệ đã có, con người vẫn chưa có khả năng sản xuất các

* Có *4* cảm biến nhiệt; một được kích khởi khi nhiệt độ trên 27°C, một trên 31°C, một trên 42°C và một trên 52°C. Cảm biến nhiệt độ trên 42°C, TRPV1, được capsaicin, hoá chất cay có trong ớt và tiêu, kích khởi.

Hình như chỉ có *1* cảm biến lạnh, kênh ion TRPM8, được kích khởi trong khoảng từ 8 tới 26°C. Nó cũng được menthol, một hoá chất có trong mojito và bạc hà kích khởi. Neuron lạnh, tức là neuron có TRPM8 ở đầu của chúng, có thể thấy được nhờ kỹ thuật đặc biệt sử dụng fluorescence, có ở trong răng; chúng mang tới cho bạn cảm giác mà bạn sẽ gặp ở phòng nha khoa khi nha sĩ kiểm tra răng bằng không khí nén.

** Độ nhạy của vị giác *không* tách thành các vùng riêng rẽ trên lưỡi; điều sai lầm này đã được sao chép từ sách này sang sách khác trên 100 năm nay. Bạn có thể tự kiểm chứng bằng cách sử dụng các hạt đường hay
Câu đố 22 s
muối.

*** Linda Buck và Richard Axel đã nhận giải Nobel y học năm 2004 nhờ đã minh giải hoạt động của khứu giác.

cảm biến tốt như của vi khuẩn; người ta đã biết *Escherichia coli* có thể nhận ra ít nhất 30 chất trong môi trường quanh nó.

Động vật có các loại cảm biến phụ. Cá mập có thể *cảm nhận được điện trường*. Nhiều loại rắn có các *cảm biến hồng ngoại*, như rắn lục hay dơi quỷ. Những cảm biến này được sử dụng để định vị con mồi hay nguồn thức ăn. Một số bọ cánh cứng như *Melanophila acuminata*, cũng có khả năng phát hiện tia hồng ngoại; chúng sử dụng khả năng này định vị các đám cháy rừng để nhiệt làm cho trứng nở. Cũng có loài côn trùng khác có các cơ quan như vậy. Bồ câu, cá hồi và cá mập có thể *cảm nhận được từ trường* và sử dụng khả năng này như phương tiện đạo hàng. Nhiều loài chim và côn trùng có thể *thấy tia tử ngoại*. Dơi và cá heo có thể *nghe được siêu âm* có tần số lên đến 100 kHz và cao hơn. Cá voi và voi có thể phát hiện và định vị các tín hiệu *hạ âm*.

Quyển III, trang 32
Quyển I, trang 325

Tóm lại, các cảm biến mà thiên nhiên cung cấp cho chúng ta mang đầy tính nghệ thuật, rất nhạy và dễ sử dụng. Vì mọi cảm biến đều kích khởi sự hỷ lạc hoặc giúp ta tránh được đau đớn, rõ ràng thiên nhiên muốn ta thưởng ngoạn cuộc đời với niềm vui mãnh liệt nhất. Nghiên cứu môn vật lý là cách ta thực hiện điều này.

Xem 21

> Có hai điều làm cho đời đáng sống: Mozart và cơ học lượng tử.
>
> Victor Weisskopf*

Dây thần kinh và não bộ

> Không có sự bình tâm vĩnh cửu khi ta sống trên đời này; vì cuộc đời chỉ là sự chuyển động và không thể không có ham muốn, sợ hãi, hay cảm giác.
>
> Thomas Hobbes, *Leviathan*.

Bộ phận chính, xử lý mọi tín hiệu do cảm biến gởi tới não bộ chủ yếu dành cho mọi xúc cảm hoan lạc. Não người có độ phức tạp cao nhất trong các bộ não mà ta đã biết.** Hơn nữa năng lực và tốc độ xử lý của não người vẫn lớn hơn mọi thiết bị do con người tạo ra.

Trước kia ta đã thấy cách các tín hiệu điện, từ các cảm biến chuyển vào trong não. Bên trong não, tín hiệu tới *được phân loại* và *lưu trữ*, có lúc chỉ trong một thời gian ngắn, có lúc lâu dài. Phần lớn các cơ chế lưu trữ và cường độ kết nối giữa các tế bào não xảy ra trong các *synapse*, như ta đã thấy. Phần còn lại mà ta phải tìm hiểu là sự phân loại, quá trình mà ta thường gọi là *sự tư duy*. Ta đã biết cơ chế phân loại ở mức thấp, như hình dạng hình học đối với mắt hay các hoà âm đối với tai. Nhưng với sự phân loại ở mức

Quyển I, trang 314
Quyển III, trang 264

* Victor Friedrich Weisskopf (b. 1908 Vienna, d. 2002 Cambridge), nhà vật lý lý thuyết nổi tiếng từng làm việc với Einstein, Born, Bohr, Schrödinger và Pauli. Ông đã góp phần vào sự phát triển của Điện động lực học lượng tử và Vật lý hạt nhân. Ông làm việc trong dự án Manhattan nhưng sau đó ông lại tích cực vận động chống lại việc sử dụng vũ khí hạt nhân. Trong chiến tranh lạnh ông nhận làm thành viên của viện hàn lâm khoa học Soviet. Ông là giáo sư của MIT và là giám đốc của CERN, ở Geneva trong nhiều năm. Ông rất thành công trong việc viết sách giáo khoa vật lý. Tác giả đã nghe câu phát biểu trên năm 1982, trong một bài giảng của ông.

** Điều này không mâu thuẫn với sự kiện một số loài *cá voi* có khối lượng não lớn hơn. Khối lượng lớn là do não cần được bảo vệ chống lại áp suất lớn xuất hiện khi cá voi lặn xuống nước (một số đạt tới độ sâu 1 km). Số neuron trong não cá voi ít hơn số neuron trong não người rất nhiều.

cao, như sự phân loại được sử dụng trong sự tư duy về các khái niệm, người ta chưa đạt được mục tiêu. Ta vẫn chưa biết cách mô tả các quá trình đọc hiểu, theo chuyển động của các tín hiệu. Việc nghiên cứu vẫn còn nhiều biến động và có thể vẫn tiếp tục như vậy trong thế kỷ 21.

Trong phần sau đây ta hãy tìm hiểu một vài khả năng của não, của cơ thể và của các vật thể khác có vai trò quan trọng đối với các loại hỷ lạc mà ta đã trải nghiệm khi tìm hiểu về chuyển động.

Đồng hồ sinh học

> “L'horologe fait de la réclame pour le temps.* ”
> Georges Perros

Quyển I, trang 45
Ta đã có một tổng quan về đồng hồ sinh học ở đầu cuộc phiêu lưu. Chúng áp dụng chung cho vi khuẩn, thực vật và động vật. Và như Bảng 3 cho thấy, không có đồng hồ sinh học thì không có sự sống cũng như niềm hoan lạc.

Khi hát một nốt nhạc vừa nghe qua, ta đã có thể tái tạo khá chính xác tần số ban đầu. Ta cũng đã biết qua kinh nghiệm là con người có thể giữ nhịp rất nhặt trong một khoảng thời gian dài. Khi hoạt động thể thao hay khiêu vũ, ta có thể định thời rất chính xác. (Đối với thời gian ngắn hay dài hơn, các đồng hồ bên trong không còn chính xác như vậy nữa.) Tất cả các đồng hồ này đều đặt trong não. Xem 22

Não xử lý thông tin. Máy tính cũng làm việc này và giống như máy tính, mọi bộ não đều cần có một đồng hồ để hoạt động cho hiệu quả. Mỗi đồng hồ đều có cấu tạo như nhau. Nó cần một *bộ dao động* để xác định nhịp độ và một bộ phận cung cấp năng lượng cho bộ dao động. Thêm vào đó, mỗi đồng hồ cần một *bộ đếm* dao động, tức là một bộ phận đọc tín hiệu đồng hồ và một phương tiện *phân bố tín hiệu* khắp hệ thống để đồng bộ hoá các quá trình gắn liền với nó. Sau cùng, đồng hồ cần một *cơ cấu tái khởi động*. Nếu đồng hồ phải kiểm soát nhiều thang đo thời gian, nó cần nhiều bộ dao động có tần số dao động khác nhau và phương thức thiết đặt lại các phase tương đối của chúng.

Dù các nhà vật lý biết rõ cách tạo ra một đồng hồ hoàn thiện nhưng ta vẫn chưa hiểu tường tận về các đồng hồ sinh học. Phần lớn các hệ dao động sinh học là các hệ hoá học; có một số như cơ tim hay bộ định thời của não bộ là các hệ điện tử. Việc giải thích về các hệ dao động hoá học là công của Ilya Prigogine; nó đã đem lại cho ông giải Nobel hoá học năm 1977. Nhưng không phải người ta đã biết tất cả về các hệ dao động hoá học cũng như bộ đếm trong cơ thể người. Chu kỳ 24-phút trong tế bào của người chỉ mới được khám phá vào năm 2003 và người ta cũng chưa biết đầy đủ về cơ chế dao động, chỉ biết rằng tế bào đã được tiếp những giọt nước lớn với chu kỳ 27–phút thay vì 24–phút. Có thể nhịp điệu và đồng hồ hằng ngày, được tạo ra hay khởi động lại sau mỗi 60 chu kỳ 24–phút này, do một số tế bào chủ trong cơ thể người kích khởi. Cơ chế tái khởi động của chúng cũng do ánh sáng ban ngày kích khởi; các tế bào trong mắt người, vật thực hiện động tác này, đã được xác định vào năm 2002. Tín hiệu ánh sáng từ các tế bào được nhân chéo trên, hai cấu trúc dành riêng ở vùng dưới đồi trong não, xử lý. Các tế bào khác nhau trong cơ thể người hoạt động phụ thuộc vào phase của chiếc đồng hồ này. Xem 23 Xem 24

Các đồng hồ có chu kỳ dài nhất trong cơ thể con người điều khiển *sự lão hoá*. Một trong số các đồng hồ lão hoá nổi tiếng là đồng hồ giới hạn số lần bào phân. Thật vậy,

* ‘Đồng hồ là sự quảng cáo cho thời gian.’

BẢNG 3 Các thí dụ về nhịp điệu và đồng hồ sinh học.

Sinh vật	Hệ dao động	Chu kỳ
Bọ chét cát (*Talitrus saltator*)	tránh xa vị trí của Mặt trời hay Mặt trăng	hằng ngày
Người (*Homo sapiens*)	sóng gamma trong não	0.023 tới 0.03 s
	sóng alpha trong não	0.08 tới 0.13 s
	nhịp tim	0.3 tới 1.5 s
	sóng delta trong não	0.3 tới 10 s
	tuần hoàn máu	30 s
	nhịp điệu mỗi giờ của tế bào	1 tới 2 ks
	chu kỳ giấc ngủ đảo mắt nhanh	5.4 ks
	chu kỳ mũi	4 tới 14 ks
	chu kỳ hormone tăng trưởng	11 ks
	nhân chéo trên (SCN), nồng độ hormone hằng ngày, nhiệt độ, v.v...; dẫn tới sự mệt mỏi sau chuyến bay dài	90 ks
	đồng hồ của da	hằng ngày
	kinh nguyệt	2.4(4) Ms
	quá trình lão hoá	3.2(3) Gs
Ruồi nhà (*Musca domestica*)	đập cánh	30 ms
Ruồi giấm (*Drosophila melanogaster*)	đập cánh tán tỉnh	34 ms
Đa số côn trùng (thí dụ ong, ruồi giấm)	phát hiện mùa đông đến gần (thời kỳ đình dục) theo chiều dài của ngày; kích khởi những thay đổi của sự biến dưỡng	hằng năm
Tảo (*Acetabularia*)	nồng độ Adenosinetriphosphate (ATP)	
Mốc bánh mì đỏ (thí dụ *Neurospora crassa*)	sự hình thành bào tử	hằng ngày
Nhiều thực vật có hoa	hoa mở và khép cánh	hằng ngày
Cây thuốc lá	đồng hồ nở hoa (quang chu kỳ); gây ra do chiều dài của ngày, được Garner và Allard khám phá vào năm 1920	hằng năm
Arabidopsis	chương động của ngọn cây	hằng ngày
	tăng trưởng	vài giờ
Cây cờ hiệu (*Desmodium gyrans*)	sự quay lá	200 s
Forsythia europaea, F. suspensa, F. viridissima, F. spectabilis	dao động của cánh hoa, Van Gooch khám phá vào năm 2002	5.1 ks

số lần phân chia trong phần lớn các tế bào của cơ thể người là hữu hạn và thường nằm giữa 50 và 200. (Có một ngoại lệ là các tế bào sinh sản – ta sẽ không thể hiện hữu nếu chúng không có khả năng phân chia vô hạn.) Người ta đã xác định được Bộ đếm số lần

bào phân; nó là *đoan lạp*, một cấu trúc đặc biệt của DNA và protein nằm ở hai đầu của mỗi nhiễm sắc thể. Cấu trúc này giảm đi một lượng nhỏ trong mỗi lần bào phân. Sự bào phân sẽ ngừng khi phần này quá ngắn. Tiên đoán thuần tuý lý thuyết của Alexei Olovnikov năm 1971 đã được nhiều nhà nghiên cứu chứng minh. (Chỉ có người chứng minh nhận được giải Nobel y học năm 2009.) Các nghiên cứu về cơ chế và các ngoại lệ của quá trình này, như ung thư và tế bào sinh dục, vẫn đang tiếp diễn.

Không phải mọi đồng hồ trong cơ thể người và cách hoạt động của chúng đều đã được hiểu hết. Thí dụ như những kiến thức cơ bản về kinh nguyệt của phụ nữ thì thú vị nhưng phức tạp và chưa rõ ràng.

Những chiếc đồng hồ hấp dẫn khác là nền tảng của thời gian *có ý thức*. Trong các đồng hồ này, *đồng hồ đếm giờ của não* đã được nghiên cứu nhiều nhất. Gần đây người ta mới biết được hoạt động của nó nhờ kết hợp các dữ liệu nghiên cứu về bệnh tật và sự Xem 25 tổn thương của người, sự cộng hưởng từ và tác dụng của thuốc đặc trị. Hoạt động đếm thời gian cơ bản này xảy ra trong thể vân của hạch đáy não. Thể vân chứa hàng ngàn tế bào đếm giờ với chu kỳ khác nhau. Chúng có thể bị kích khởi bởi một tín hiệu 'bắt đầu'. Do số lượng lớn và vì các khoảng thời gian nhỏ cỡ 1 giây, nên tín hiệu đi ngang qua các tế bào có những kiểu thức khác nhau. Não có thể đọc và học những kiểu thức đó. Theo phương thức này ta có thể định thời trong âm nhạc hay trong những công việc đặc biệt nào đó, thí dụ như: 1 giây sau một tín hiệu chẳng hạn.

Mặc dù ta chưa biết hết mọi cơ chế của đồng hồ trong cơ thể người, các đồng hồ sinh học đều có chung một tính chất với các đồng hồ nhân tạo và đồng hồ vô sinh: chúng đều bị giới hạn bởi cơ học lượng tử. Ngay cả con lắc đơn cũng bị giới hạn bởi Thuyết lượng tử.

Đồng hồ đã có từ lúc nào?

> “Die Zukunft war früher auch besser.*”
> Karl Valentin.

Khi tìm hiểu Thuyết tương đối tổng quát, ta đã thấy rằng không có đồng hồ hấp dẫn thuần tuý vì không thể tạo ra đơn vị đo thời gian nếu chỉ sử dụng hai hằng số c và G. Quyển II, trang 287 Đồng hồ giống như các chuẩn đo lường khác, muốn hoạt động được, cần phải tương tác (không phải là tương tác hấp dẫn) với vật chất. Đây là lĩnh vực của Thuyết lượng tử. Ta hãy xem xét trường hợp này.

Xem 26 Trước tiên, trong Thuyết lượng tử, thời gian *không phải là* một biến động lực. Thật vậy, toán tử thời gian không phải là toán tử Hermite. Nói cách khác, Thuyết lượng tử cho rằng không có biến động lực nào tỷ lệ với thời gian. Mặt khác, đồng hồ khá thông dụng; Mặt trời hay đồng hồ Big Ben đều làm mọi người hài lòng. Các thí nghiệm đều khuyến khích ta tìm một toán tử mô tả vị trí kim đồng hồ. Nhưng nếu làm như vậy ta sẽ gặp một kết quả kỳ lạ. Một hệ lượng tử có toán tử Hamilton bị chặn dưới – có một năng lượng cực tiểu – thì lại không có toán tử Hermite có giá trị tăng đơn điệu theo thời gian. Người ta có thể chứng minh kết quả này một cách chặt chẽ như một định lý toán học.

Lấy một đồng hồ con lắc. Trong các đồng hồ như vậy, quả nặng sẽ ngừng lại khi đến vị trí thấp nhất. Tổng quát hơn, mọi đồng hồ đều ngừng khi pin hay nguồn năng lượng

* 'Tương lai vẫn thường tốt hơn quá khứ.' Karl Valentin (b. 1882 Munich, d. 1948 Planegg), văn sĩ, nhà soạn kịch và diễn viên hài.

cạn kiệt. Nói cách khác, trong các đồng hồ thực, toán tử Hamilton bị chặn dưới. Và theo định lý trên thì một đồng hồ như vậy không hoạt động được.

Tóm lại, Thuyết lượng tử chứng tỏ rằng *trong thiên nhiên không có đồng hồ đúng*. Nó cho rằng mọi đồng hồ chỉ có thể *gần đúng*. Người ta không thể đo thời gian một cách chính xác mà chỉ có thể đo gần đúng. Hiển nhiên là kết quả này quan trọng đối với đồng hồ có độ chính xác cao. Điều gì sẽ xảy ra khi ta tăng độ chính xác đồng hồ lên hết cỡ?

Độ chính xác càng cao thì càng nhạy với các thăng giáng. Mọi đồng hồ đều có một bộ dao động bên trong tức là một động cơ giúp chúng hoạt động. Đồng hồ chính xác cần một bộ dao động chính xác. Trong mọi đồng hồ, vị trí của bộ dao động được đọc và hiển thị trên một mặt chia độ. Lượng tử tác dụng hàm ý rằng một bộ dao động dù chính xác cũng có một độ bất định về vị trí. Như vậy độ chính xác của đồng hồ có giới hạn.

Điều tệ hơn là giống như một hệ lượng tử bất kỳ, bộ dao động của đồng hồ dù nhỏ thì cũng có một xác suất hữu hạn để ngừng hay chạy ngược lại trong một khoảng thời gian. Bạn có thể tự kiểm tra điều này. Chỉ cần nhìn vào đồng hồ khi 'hết pin' hay khi quả nặng của hệ cung cấp năng lượng 'chạm đáy'. Đồng hồ sẽ bắt đầu các chuyển động khôi hài, như đi ngược lại một chút hay nhảy tới nhảy lui. Khi đồng hồ hoạt động bình thường, hiện tượng này bị triệt tiêu tuy nó có thể xảy ra dù với một xác suất rất nhỏ. Điều này
Câu đố 24 e cũng đúng cho đồng hồ Mặt trời.

Tóm lại, đồng hồ phải là *hệ vĩ mô* để chạy đúng. Nó phải đủ lớn để quân bình các thăng giáng. Các hệ thiên văn là một thí dụ như vậy. Một đồng hồ chạy tốt cũng phải là một đồng hồ *được cô lập* với môi trường, như một vật rơi tự do có toạ độ được sử dụng làm biến thời gian. Điều này đã được áp dụng trong đồng hồ quang nguyên tử.

Độ chính xác của đồng hồ

Nếu sự hạn chế của đồng hồ là do Thuyết lượng tử thì độ chính xác cao nhất τ của đồng hồ là bao nhiêu? Trước tiên hệ thức bất định đặt ra một giới hạn về khối lượng của một
Câu đố 25 ny đồng hồ. Khối lượng đồng hồ M phải thoả hệ thức

$$M > \frac{\hbar}{c^2\tau} \tag{2}$$

Câu đố 26 e điều này luôn đạt được trong đời sống hằng ngày. Nhưng ta có thể làm tốt hơn. Giống như một con lắc, ta có thể liên hệ độ chính xác τ của đồng hồ với thời gian đọc lớn nhất
Xem 27 T. Ý tưởng này được Salecker và Wigner đưa ra đầu tiên. Họ cho rằng

$$M > \frac{\hbar}{c^2\tau}\frac{T}{\tau} \tag{3}$$

trong đó T là thời gian đo được. Bạn có thể kiểm tra là điều kiện này đòi hỏi đồng hồ phải có tính *vĩ mô*. Hãy xem công thức của Salecker và Wigner. Ta có thể phát biểu nó dưới một dạng khác. Đối với đồng hồ có thể đo thời gian t, giữa kích thước l và khối lượng m có hệ thức

$$l > \sqrt{\frac{\hbar t}{m}}\ . \tag{4}$$

Xem 28

Ta có thể tiến sát giới hạn này đến cỡ nào? Hoá ra đồng hồ nhỏ nhất, tiếp cận giới hạn này gần nhất là vi khuẩn. Vi khuẩn nhỏ nhất, *mycoplasmas*, có khối lượng khoảng $8 \cdot 10^{-17}$ kg, sinh sản 100 phút một lần, với độ chính xác khoảng 1 phút. Kích thước được tiên đoán từ biểu thức (4) là từ 0.09 µm và 0.009 µm. Kích thước quan sát được của mycoplasmas nhỏ nhất là 0.3 µm. Sự kiện vi khuẩn có thể tiến sát giới hạn của đồng hồ cho ta thấy rằng sự tiến hoá là một kỹ sư tài ba nhất.

Ta cũng nên nhớ rằng yêu cầu của Salecker và Wigner không mâu thuẫn với khả năng tạo ra các *bộ dao động* đồng hồ rất nhỏ; các nhà nghiên cứu đã tạo ra các bộ dao động chỉ có một nguyên tử đơn lẻ. Đúng ra các dao động như vậy sẽ là các đồng hồ chính xác nhất do con người làm ra. Nhưng bộ dao động chỉ là một phần của đồng hồ như ta đã giải thích ở trên.

Xem 29

Trang 42

Trong thế giới thực, giới hạn đồng hồ có sát sao hơn. Không thể sử dụng cả khối lượng M trong giới hạn trên. Đối với các đồng hồ làm bằng các nguyên tử, ta chỉ có thể sử dụng năng lượng liên kết giữa các nguyên tử. Điều này dẫn đến *giới hạn lượng tử tiêu chuẩn của đồng hồ*; nó giới hạn độ đúng của tần số đồng hồ ν theo hệ thức

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = \sqrt{\frac{\Delta E}{E_{\text{tot}}}} \qquad (5)$$

trong đó $\Delta E = \hbar/T$ là độ bất định năng lượng bắt nguồn từ thời gian đo hữu hạn T và $E_{\text{tot}} = NE_{\text{bind}}$ là tổng năng lượng liên kết của các nguyên tử trong thước đo. Tính cho đến nay, chưa có đồng hồ nào đạt tới giới hạn lượng tử mặc dù có nhiều thí nghiệm đã tiến gần đến giới hạn đó.

Tóm lại, chỉ có những đồng hồ trong giới hạn mà $\hbar$ có thể bỏ qua. Trong thực tế, có thể giảm thiểu sai số do đồng hồ và thước đo bằng cách làm đồng hồ đủ lớn. Đồng hồ được tạo ra trong não người phù hợp với yêu cầu này. Ta có thể tiếp tục nghiên cứu kỹ càng về vật chất mà không phải lo lắng nhiều, ít nhất là trong một thời gian nào đó. Chỉ tới phần cuối của cuộc thám hiểm, khi yêu cầu về chính xác cao hơn và Thuyết tương đối tổng quát hạn chế kích thước của các hệ vật lý, thì khó khăn sẽ xuất hiện: việc không thể tạo ra các đồng hồ chính xác sẽ trở thành vấn đề chính của chúng ta.

Quyển VI, trang 65

Tại sao rất khó tiên đoán, đặc biệt là tương lai?

> Tương lai: là khoảng thời gian lúc việc kinh doanh của ta phát đạt, lúc ta biết rõ ai là bạn thật và là lúc hạnh phúc của ta được đảm bảo.
>
> Ambrose Bierce

Thiên nhiên hạn chế sự tiên đoán của ta theo 4 cách:

1. Thuyết lượng tử, thông qua các hệ thức bất định, giới hạn độ chính xác của các phép đo, của đồng hồ và đặc biệt là của phép đo thời gian. Như vậy lượng tử tác dụng sẽ khiến ta khó xác định được trạng thái ban đầu với độ chính xác hoàn toàn – ngay cả đối với hệ chỉ có 1 hạt.

Quyển I, trang 239

2. Số lượng hạt nhiều sẽ làm ta khó tiên đoán tương lai do bản chất thống kê của các điều kiện ban đầu của chúng.

Quyển I, trang 423

3. Sự tiên đoán tương lai đã trở nên khó khăn do tính phi tuyến và do sự phân kỳ từ

các điều kiện lân cận ban đầu.

4. Một topo không-thời gian không tầm thường có thể hạn chế khả năng tiên đoán. Thí dụ như hố đen và chân trời có thể hạn chế khả năng tiên đoán do sự hàm chứa một chiều của năng lượng, khối lượng và tín hiệu.
Quyển II, trang 111
5. Trong phần cuối của cuộc thám hiểm, ta sẽ khám phá ra rằng hiệu ứng hấp dẫn lượng tử sẽ khiến cho ta không thể có một định nghĩa chính xác về không thời gian.
Quyển VI, trang 40

Như vậy các phép đo và tính dự đoán được trong thực tế bị hạn chế. Lý do chính của sự giới hạn này chính là lượng tử tác dụng. Nhưng nếu lượng tử tác dụng ngăn cản việc tạo ra các đồng hồ hoàn hảo thì tất định luận có còn mô tả đúng về thiên nhiên hay không? Thời gian có hiện hữu không? Câu trả lời cũng rõ ràng: có và không. Ta đã biết mọi giới hạn của đồng hồ đã nói ở trên đều có thể vượt qua trong những khoảng thời gian giới hạn; thật ra ta có thể làm cho những khoảng thời gian này lớn đến nỗi các giới hạn trở nên *không* đáng kể trong đời sống hằng ngày. Kết quả là,

▷ Trong thực tế, tất định luận và khái niệm thời gian vẫn còn khả dụng trong các hệ lượng tử.

Kết luận này vẫn đúng mặc dù lý thuyết có nói khác đi. Khả năng thưởng ngoạn cuộc đời của chúng ta bắt nguồn từ việc dòng thời gian vẫn còn nguyên vẹn.

Tuy vậy, khi dòng động lượng hay kích thước cực lớn thì ta không thể chỉ áp dụng Thuyết lượng tử; trong những trường hợp đó ta cần dùng đến Thuyết tương đối tổng quát. Các hiệu ứng quyến rũ xảy ra trong các trường hợp này sẽ được ta tìm hiểu kỹ càng ngay sau đây.

Quyển VI, trang 57

Sự phân rã và quy luật vàng

“Điều tôi thích nhất là nhớ được tương lai.”
Salvador Dalì

Mọi lạc thú chỉ có ý nghĩa khi ta đối diện với thần chết. Và cái chết chính là một dạng phân rã. Phân rã là một sự thay đổi tự phát. Giống như bản chất sóng của vật chất, phân rã là một quá trình không có sự tương tự cổ điển. Dĩ nhiên một sự phân rã bất kỳ – bao gồm sự phát ra ánh sáng của một ngọn đèn, sự kích khởi một cảm biến của máy ảnh, hiện tượng phóng xạ hay sự lão hoá của con người – đều có thể quan sát theo lối cổ điển; tuy vậy, *nguồn gốc* của sự phân rã là một hiệu ứng lượng tử thuần tuý.

Trong sự phân rã của các hệ hay các hạt không bền, sự mất điều hợp của sự chồng chập các trạng thái phân biệt vĩ mô đóng một vai trò quan trọng. Thật vậy, thí nghiệm chứng tỏ rằng việc tiên đoán sự phân rã đối với một hệ đặc biệt, giống như sự tán xạ của một hạt, chỉ có thể *tính trung bình* đối với một số lớn các hạt hay hệ, chứ không thể áp dụng cho một hạt đơn lẻ. Các thí nghiệm này khẳng định nguồn gốc lượng tử của sự phân rã. Trong mỗi quá trình phân rã, sự chồng chập các trạng thái phân biệt vĩ mô – trong trường hợp này là sự chồng chập của các hạt đã và chưa phân rã – bị mất điều hợp một cách nhanh chóng do sự tương tác với môi trường. Thường thường ‘môi trường’ là chân không, với sự thăng giáng của các trường điện từ, các trường yếu và mạnh, đủ để tạo ra sự mất điều hợp. Thường thì ta không thể biết chi tiết về các trạng thái của môi trường có liên quan đối với một hệ đơn lẻ và do đó ta cũng không thể tiên đoán được
Quyển IV, trang 144

điều gì.

Nguồn gốc của sự phân rã là gì? Sự phân rã luôn bắt nguồn từ *sự xuyên hầm*. Theo ngôn ngữ của Điện động lực học lượng tử, ta có thể nói rằng phân rã là sự chuyển động sinh ra do sự thăng giáng của chân không. Sự thăng giáng của chân không có tính ngẫu nhiên. Thí nghiệm về các bản mỏng khẳng định sự quan trọng của thăng giáng của môi trường đối với quá trình phân rã.

Thuyết lượng tử làm cho việc mô tả sự phân rã trở nên đơn giản. Đối với một hệ gồm một số rất lớn N các hạt đồng nhất đang phân rã, *sự phân rã* được mô tả bằng phương trình

$$\dot{N} = -\frac{N}{\tau} \quad \text{trong đó} \quad \frac{1}{\tau} = \frac{2\pi}{\hbar} \left|\langle \psi_{\text{initial}} | H_{\text{int}} | \psi_{\text{final}} \rangle\right|^2 . \tag{6}$$

Kết quả $\dot{N} = \mathrm{d}N/\mathrm{d}t$ được Fermi đặt tên là *quy luật vàng*,* vì mặc dù nó là quy luật gần đúng nhưng hoạt động tốt đến nỗi ta khó mà xác định được phạm vi áp dụng của nó.

Câu đố 27 e

Từ quy luật vàng ta suy ra

$$N(t) = N_0\, \mathrm{e}^{-t/\tau} . \tag{7}$$

Sự phân rã được tiên đoán là tuân theo quy luật hàm số mũ độc lập với các chi tiết của quá trình. Ngoài ra, thời gian phân rã τ phụ thuộc vào sự tương tác và bình phương của các phần tử của matrix chuyển. Trong gần một thế kỷ, mọi thí nghiệm đều khẳng định sự phân rã lượng tử theo quy luật *hàm số mũ*.

Xem 30

Mặt khác, khi Thuyết lượng tử được sử dụng để suy ra quy luật vàng, người ta nhận thấy rằng sự phân rã chỉ theo quy luật hàm số mũ trong những hệ đặc biệt. Sự tính toán có tính đến các số hạng bậc cao, tiên đoán có hai sự sai lệch với quy luật hàm số mũ đối với những hệ hoàn toàn cô lập: trong những khoảng thời gian ngắn, tốc độ phân rã sẽ *triệt tiêu*; trong thời gian dài, tốc độ phân rã sẽ phụ thuộc thời gian theo kiểu *đại số* – không phải hàm số mũ – trong một số trường hợp ngay cả với các dao động chồng chập. Sau những nỗ lực tìm kiếm, người ta đã quan sát được sự sai lệch trong thời gian ngắn. Người ta không thể tiến hành các thí nghiệm về sự sai lệch trong thời gian dài vì sự có mặt của tiếng ồn nhiệt. Tóm lại, sự phân rã chỉ theo quy luật hàm số mũ khi môi trường ồn ào, hệ được tạo nên từ các hạt tương tác yếu hay cả hai. Vì đây là trường hợp thường gặp, sự giảm theo hàm số mũ, đặc biệt về mặt toán học, trở thành quy luật (vàng) trong việc mô tả sự phân rã.

Xem 31

Bạn có thể giải thích lý do tại sao đời sống con người, mặc dù là một hiệu ứng lượng tử, lại không theo quy luật hàm số mũ không?

Câu đố 28 s

Hiện tại trong Thuyết lượng tử

> “Utere temporibus.**”
>
> Ovidius

* Đầu tiên, quy luật vàng là một lời khuyên trong kinh thánh (Matthew 7,12) cụ thể là ‘Hãy làm cho người khác những điều mà bạn muốn họ làm cho mình.’

** ‘Hãy tận dụng các cơ hội.’ *Tristia* 4, 3, 83

Xem 32
Nhiều nhà hiền triết khuyên ta nên tận hưởng hiện tại. Từ các công trình nghiên cứu về sự nhận thức, điều mà ta gọi là 'hiện tại' kéo dài từ 20 đến 70 ms. Kết quả dựa trên hiện tại sinh học này khiến ta thắc mắc là hiện tại *vật lý* có chiều dài hay không.

Trong đời sống hằng ngày, ta thường tưởng tượng rằng việc rút ngắn hết cỡ thời gian dùng để đo vị trí của một chất điểm sẽ giúp ta tiếp cận tới mức lý tưởng là hạt sẽ cố định tại điểm đã cho trong không gian. Khi Zeno lý luận về chuyển động của một mũi tên, ông đã giả sử rằng điều này có thể thực hiện được. Tuy vậy, Thuyết lượng tử đã làm thay đổi tình thế.

Ta có thể nói rằng một hệ chuyển động đang ở tại một điểm đã cho vào thời điểm đã cho hay không? Để tìm câu trả lời bằng thí nghiệm, ta có thể sử dụng một máy ảnh có thời gian đóng mở cửa trập nhỏ tuỳ ý. Ta sẽ tìm thấy điều gì? Khi thời gian đóng mở của cửa trập tiến gần đến chu kỳ dao động của ánh sáng, độ nét của ảnh sẽ giảm đi; hơn nữa, chuyển động của cửa trập cũng ảnh hưởng đến màu sắc của ánh sáng. Ta có thể tăng năng lượng của ánh sáng đang sử dụng nhưng bước sóng nhỏ đi cũng không giải quyết được vấn đề. Tệ hơn, khi bước sóng cực nhỏ, vật chất trở nên trong suốt và cửa trập không có tác dụng gì nữa. Xem xét hết mọi điều dẫn ta đến kết luận: khi giảm thời gian đóng mở cửa trập, hình ảnh trở nên không rõ. Việc không sắc nét bắt nguồn từ lượng tử tác dụng. Thuyết lượng tử không khẳng định là thời gian cửa trập càng nhỏ thì ảnh càng sắc nét. Trái lại, bản chất lượng tử của thiên nhiên cho ta thấy rằng, về nguyên tắc, không có cách để tiếp cận giới hạn mà Zeno đã bàn đến.

Tóm lại, hệ thức bất định và tác dụng cực tiểu không cho phép vật đang chuyển động có vị trí cố định ở một thời điểm đã cho. Các lý luận của Zeno dựa trên sự ngoại suy các khái niệm cổ điển vào các lĩnh vực mà nó không còn đúng nữa. Mọi thí nghiệm, như sự chụp ảnh, đều dẫn tới một *trị trung bình theo thời gian*:

> Thí nghiệm cho ta trị trung bình của các tương tác trên khoảng thời gian đã cho.

Đối với máy ảnh, thời gian là thời gian đóng mở cửa trập; trong một thí nghiệm, trị trung bình do bộ dụng cụ thí nghiệm quyết định. Bất kể dụng cụ thí nghiệm là gì, thời gian trung bình luôn khác 0. * Không có 'thời điểm kiểu hình học' để ta mô tả hiện tại. *Hiện tại* vật lý, được quan sát, luôn luôn là một trị trung bình tính trên một khoảng thời gian khác 0. Trong thiên nhiên hiện tại có chiều dài hữu hạn. Để có một giá trị thô giúp cho ta dễ lý luận, trong đa số các trường hợp, chiều dài của hiện tại sẽ nhỏ hơn 1 yoctosecond, vì vậy nó thường được bỏ qua.

Tại sao ta có thể quan sát được chuyển động?

Zeno ở Elea đã sai khi giả sử rằng chuyển động là một chuỗi các vị trí trong không gian. Thuyết lượng tử hàm ý rằng chuyển động chỉ là sự thay đổi vị trí theo thời gian *một cách gần đúng*.

Như vậy tại sao ta có thể quan sát và mô tả chuyển động trong Thuyết lượng tử? Thuyết lượng tử đã chứng tỏ chuyển động là *sự xấp xỉ ở mức năng lượng thấp* của sự tiến hoá lượng tử. Sự tiến hoá lượng tử *giả sử* rằng ta có thể thực hiện các phép đo không

Trang 50
* Việc bàn luận về hiệu ứng Zeno lượng tử dưới đây cũng không làm cho kết luận của phần này thay đổi.

thời gian với độ chính xác vừa đủ. Ta đã biết rằng đối với năng lượng quan sát đã cho, có thể tạo ra các đồng hồ và thước đo có độ chính xác cao hơn mức đòi hỏi, sao cho trong thực tế, sự tiến hoá lượng tử khả dụng trong mọi trường hợp. Chỉ cần năng lượng và thời gian không bị hạn chế, ta sẽ không gặp vấn đề gì và *chuyển động là một chuỗi các trạng thái lượng tử theo thời gian*.

Tóm lại, ta có thể quan sát được chuyển động vì đối với năng lượng và hệ đang quan sát, ta vẫn có thể tìm được một mức năng lượng cao hơn và một thời gian trung bình dài hơn, để sử dụng được các dụng cụ đo xác định không thời gian với độ chính xác cao hơn. Trong phần cuối của cuộc thám hiểm, ta sẽ khám phá ra là có một năng lượng cực đại trong thiên nhiên nên ta sẽ cần thay đổi cách mô tả trong những trường hợp đó. Tuy vậy, giá trị năng lượng này lớn đến nỗi ta không cần bận tâm đến nó vào thời điểm này.

Quyển VI, trang 46

Sự đứng yên và hiệu ứng Zeno lượng tử

Lượng tử tác dụng hàm ý không có sự đứng yên trong thiên nhiên. Đứng yên luôn luôn là một sự gần đúng hay một giá trị trung bình theo thời gian. Thí dụ như một electron liên kết với một nguyên tử, không chuyển động tự do thì đám mây xác suất, hay phân bố mật độ, ở trạng thái dừng theo thời gian. Nhưng cũng có các trường hợp đứng yên khác trong Thuyết lượng tử, *hiệu ứng Zeno lượng tử*. Thông thường sự quan sát *làm thay đổi* trạng thái của hệ. Tuy vậy, đối với một số hệ nào đó, sự quan sát lại có tác dụng ngược lại là *cố định* hệ thống.

Cơ học lượng tử cho rằng một hạt không bền có thể không bị phân rã nếu nó được quan sát liên tục. Lý do là sự quan sát, sự tương tác với thiết bị quan sát, tạo ra một xác suất, để hệ không tiến hoá, khác 0. Nếu tần số quan sát tăng lên, xác suất để hệ không phân rã dần tới 1. Ba nhóm nghiên cứu – Alan Turing năm 1954, A. Degasperis, L. Fonda và G.C. Ghirardi năm 1974, George Sudarshan và Baidyanath Misra năm 1977 – đã độc lập tiên đoán hiệu ứng mà ngày nay được gọi là *hiệu ứng Zeno lượng tử*. Nói một cách đơn giản, hiệu ứng Zeno lượng tử là: nếu bạn không rời mắt khỏi một hệ thì sẽ không thấy điều gì xảy ra.

Hiệu ứng Zeno lượng tử là một hệ quả tự nhiên của Thuyết lượng tử; tuy vậy, tính chất kỳ lạ của nó làm cho nó đặc biệt hấp dẫn. Sau khi tiên đoán được công bố, cuộc đua cho việc quan sát được hiệu ứng này trước tiên, bắt đầu. David Wineland và cộng sự đã quan sát được một phần hiệu ứng này năm 1990, và nó được Mark Raizen và cộng sự quan sát đầy đủ năm 2001. Trong thời gian đó, các nhóm khác cũng đã thực hiện nhiều thí nghiệm kiểm chứng. Như vậy tính chất kỳ lạ của Thuyết lượng tử đã được khẳng định.

Xem 33

Hiệu ứng Zeno lượng tử cũng liên quan tới sự sai lệch với quy luật hàm số mũ – bắt nguồn từ quy luật vàng – là quy luật mà Thuyết lượng tử đã tiên đoán. Thật vậy, Thuyết lượng tử cho rằng mọi sự phân rã chỉ tuân theo hàm số mũ ở những thời điểm trung gian, hàm bậc 2 trong những khoảng thời gian ngắn và hàm đa thức trong những khoảng thời gian rất dài. Hiện nay vấn đề này vẫn đang được nghiên cứu.

Xem 34

Bằng các lý luận khôn khéo, năm 2002, Saverio Pascazio và cộng sự đã tiên đoán rằng hiệu ứng Zeno lượng tử có thể được sử dụng để chụp cắt lớp các vật thể bằng tia X có cường độ rất thấp.

Tóm lại, hiệu ứng Zeno lượng tử không mâu thuẫn với kết luận không có sự đứng yên trong thiên nhiên; trong khi hiệu ứng diễn ra vẫn có sự tương tác giữa hệ và môi trường.

Xem 35
Trong một số trường hợp, quan sát thường xuyên có thể làm tăng sự phân rã hay tiến hoá. Vật lý lượng tử vẫn chứa rất nhiều hiệu ứng thú vị.

Ý thức – một kết quả của lượng tử tác dụng

Ý thức đóng vai trò cốt yếu trong niềm hoan lạc của sự sống.

▷ *Ý thức* là khả năng quan sát các điều diễn ra trong trí óc của chúng ta.

Quyển III, trang 338

Hoạt động này, giống như các loại biến đổi, có thể được quan sát và nghiên cứu. Mặc dù khó và không thể làm được điều đó bằng sự nội quan, ta vẫn có thể tìm hiểu ý thức bằng cách khác. Điều hiển nhiên là ý thức xảy ra trong não bộ. Nếu không thì ta không thể giữ liên lạc với nó. Nói một cách đơn giản, ta đã biết rằng mỗi bộ não trên Trái đất này đều chuyển động với tốc độ 1 triệu km/h xuyên qua bức xạ nền của vũ trụ; ta cũng biết rằng ý thức cũng chuyển động cùng với nó.

Não là một hệ lượng tử: nó hoạt động dựa trên phân tử và dòng điện. Sự thay đổi trong ý thức xuất hiện khi vật chất bị lấy đi khỏi não – trong phẫu thuật hay tai nạn – hay khi dòng điện được truyền vào não – trong tai nạn, thí nghiệm hay điều trị sai – đã được mô tả chi tiết trong y học. Ta cũng đã quan sát được ảnh hưởng của hoá chất lên não – từ rượu tới ma tuý. Não là một hệ lượng tử.

Các máy chụp ảnh hiện đại có thể phát hiện được phần của não đang hoạt động khi ta có cảm giác, hồi tưởng hay tư duy. Hình ảnh, âm thanh và tư tưởng được xử lý trong não và ta có thể theo dõi các quá trình này bằng các dụng cụ đo. Các máy chụp ảnh tốt nhất
Trang 162
hoạt động dựa trên hiện tượng cộng hưởng từ được mô tả dưới đây. Một kỹ thuật chụp ảnh khác, khó hiểu hơn, phép chụp cắt lớp positron, hoạt động bằng cách cho người nuốt đường phóng xạ. Cả hai kỹ thuật đều cho ta tìm thấy các vị trí của ý nghĩ và sự phụ thuộc của chúng vào hoá chất. Ngoài ra, ta đã biết rằng ký ức phụ thuộc vào bản chất hạt của vật chất. Tất cả các thí nghiệm này đều phụ thuộc vào lượng tử tác dụng.

Ngày nay, ta đang ở trong tình trạng giống như các khoa học gia về vật liệu cách nay một thế kỷ: họ biết rằng vật chất được tạo thành từ các hạt mang điện nhưng không thể chỉ ra *cách* mà vật chất được tạo nên. Tương tự như vậy, hiện nay ta đã biết rằng ý thức được tạo thành từ việc truyền và xử lý tín hiệu trong não; ta đã biết ý thức là một quá trình điện hoá. Nhưng ta chưa biết chi tiết về *cách* mà tín hiệu tạo nên ý thức. Việc làm rõ sự hoạt động của hệ lượng tử đầy mê hoặc này là mục tiêu của Thần kinh học. Đây là một trong các thách thức lớn nhất của khoa học thế kỷ 21.

Bạn có thể bổ sung thêm một số lập luận để chứng tỏ rằng ý thức là một quá trình vật lý hay không? Bạn có thể chứng minh rằng không chỉ ý thức của những người khác mà cả ý thức của bạn cũng là một quá trình lượng tử không? Hơn nữa, bạn có thể chứng minh rằng, mặc dù là một quá trình lượng tử, sự điều hợp không có vai trò quan trọng
Câu đố 29 s
trong ý thức hay không?

Tóm lại, ý thức của chúng ta là một hệ quả của vật chất đã tạo nên chúng ta. Ý thức và niềm hoan lạc phụ thuộc vào vật chất, sự tương tác của nó và lượng tử tác dụng.

Lại nói về lý do tại sao ta có thể quan sát được chuyển động

Việc tìm hiểu thiên nhiên có lẽ là một trong những điều hạnh phúc nhất trên đời. Mọi niềm hoan lạc đều dựa trên khả năng quan sát hay phát hiện chuyển động của chúng ta.

Và con người là điều kiện quyết định cho khả năng này. Đặc biệt, cho đến bây giờ ta đã tìm được các mối liên hệ sau đây: ta cảm nhận được chuyển động

— vì ta có kích thước hữu hạn, đặc biệt, vì ta lớn so với bước sóng cơ lượng tử của chúng ta (nên ta không cảm nhận được các hiệu ứng sóng trong đời sống hằng ngày),
— vì ta lớn so với hố đen có cùng khối lượng với ta (nên ta có những tương tác hữu ích với môi trường xung quanh),
— vì ta được tạo ra từ một số lớn nhưng hữu hạn nguyên tử (để tạo ra ký ức và khả năng quan sát),
— vì ta có ký ức hữu hạn (nên ta có thể xoá nó đi),
— vì ta có nhiệt độ hữu hạn và khiêm tốn (do đó ta có một thời gian sống khác 0 và ta có thể là những cái máy làm việc),
— vì ta là một hỗn hợp chất lỏng và rắn (giúp ta có thể chuyển động và làm thí nghiệm),
— vì ta gần như trung hoà về điện (khiến cho các cảm biến của chúng ta không bị 'sa lầy'),
— vì não buộc ta phải ước tính không thời gian bằng những thực thể liên tục (nếu khác đi thì ta không thể hình thành được những khái niệm này),
— vì não của ta không thể tránh khỏi việc mô tả thiên nhiên được tạo thành từ các phần khác nhau (nếu không ta không thể nói hay suy nghĩ),
— vì tổ tiên ta được tái tạo,
— vì ta là động vật (và như vậy ta có não),
— vì đời sống tiến hoá trên Trái đất này,
— vì ta sống trong một vùng tương đối yên tĩnh của Ngân hà (nên sự tiến hoá có thể xảy ra), và
— vì loài người tiến hoá sau big bang rất lâu (khi điều kiện đã thân thiện với cuộc sống).

Nếu một trong các điều kiện này – và các điều kiện khác – không được thoả mãn, ta sẽ không quan sát được chuyển động và ta sẽ không có niềm vui tìm hiểu Vật lý. Đúng ra ta cũng có thể nói: nếu thiếu một trong các điều kiện trên, sẽ không có chuyển động. Trong nhiều trường hợp, chuyển động là một ảo thị, như Zeno của Elea đã đề cập cách nay đã lâu. Dĩ nhiên chuyển động là một ảo thị *không tránh khỏi*, điều đã được nhiều động vật và máy móc khác chia sẻ. Thật tình mà nói thì hiện tượng và khái niệm chuyển động là kết quả của những tính năng và hạn chế của thế nhân. Việc mô tả đầy đủ chuyển động và thiên nhiên phải tính đến điều này. Trước khi bước vào đoạn cuối cuộc hành trình, ta sẽ tìm hiểu thêm một vài điều nữa.

Quyển I, trang 15

Những câu đố vui và lạ về sự trải nghiệm lượng tử

Phần lớn các đồng hồ được sử dụng trong đời sống hằng ngày, có trong cơ thể người hay được con người tạo ra, đều là đồng hồ điện từ. Một đồng hồ treo tường bất kỳ, dù được điều khiển theo kiểu cơ, thạch anh, vô tuyến hay mặt trời đều dựa trên các hiệu ứng điện từ. Bạn có biết một ngoại lệ nào không?

Câu đố 30 s

* *

Khứu giác rất phức tạp. Thí dụ chất có mùi rất khó chịu với người là *skatole*, còn có tên là *3-methylindole*. Đây là phân tử mà mũi người nhạy nhất. Skatole làm cho phân có mùi khó chịu; nó là kết quả của haemoglobin khi đi vào đường tiêu hoá xuyên qua mật.

Skatole không gây khó chịu cho mọi động vật; khác với con người, ruồi lại bị nó thu hút. Skatole cũng được một số cây tạo ra vì lý do này.

Mặt khác, một lượng *nhỏ* skatole không làm con người khó chịu. Skatole cũng được công nghiệp thực phẩm sử dụng với các lượng nhỏ để tạo mùi vị cho kem vani – mặc dù nó có tên khác.

* *

Ta cũng nên nhớ rằng giác quan của người phát hiện được năng lượng có độ lớn khác nhau. Mắt có thể phát hiện quang năng cỡ 1 aJ, trong khi xúc giác có thể phát hiện năng lượng cỡ 10 μJ. Có phải một trong hai hệ này có tương đối tính hay không? Câu đố 31 s

* *

Bản vẽ xây dựng của người được chứa trong DNA. DNA được tạo nên từ 20 000 gene, chiếm khoảng 2 % DNA, và 98 % là DNA không mã hoá, từng được gọi là 'DNA phế liệu'. Con người có số gene nhiều như các con sâu; thực vật còn có nhiều gene hơn. Vào khoảng năm 2010 nhờ các dự án 'giải mã' quốc tế, người ta đã biết rõ công dụng của 98 % DNA phụ: mở/tắt gene. Chúng tạo thành *bộ phận quản trị* của các gene và hoạt động bằng cách liên kết với các protein đặc biệt.

Các nghiên cứu cho ta thấy nhiều khuyết tật và bệnh di truyền không bắt nguồn từ các sai hỏng trong gene mà từ các sai hỏng của các bộ điều khiển này. Đây là một lĩnh vực nghiên cứu khá nhộn nhịp.

* *

Dù ở trong bóng tối hoàn toàn, mắt cũng không cho ta một ấn tượng tối đen mà là một cảm giác hơi sáng, được gọi là *màu xám riêng*. Đây là kết quả của tín hiệu nhiễu được tạo ra bên trong mắt, có lẽ được kích khởi do sự phân rã tự phát của rhodopsin, hay xen kẽ với sự giải phóng tự phát của chất dẫn truyền thần kinh.

* *

Độ nhạy cao của tai có thể được sử dụng để *nghe* ánh sáng. Để làm điều này, hãy lấy một lọ mứt không, thể tích 750 ml. Giữ trục của lọ nằm ngang, hơ đen nửa trên bên trong lọ bằng đèn cầy. Nửa dưới để trong suốt. Sau đó, đóng nắp lọ và khoan một lỗ rộng từ 2 tới 3 mm. Nếu bạn giữ cái lọ, quay lỗ về phía tai, mặt đen quay lên và chiếu vào lọ, từ dưới lên bằng một đèn tròn 50 W, điều kỳ lạ sẽ xảy ra: bạn nghe một âm có tần số 100 Hz. Tại sao? Câu đố 32 s

* *

Phần lớn các giác quan đã hoạt động trước khi bạn ra đời. Từ nhiều thế kỷ qua người ta đã biết đến việc đàn violon cho các bà mẹ đang mang thai nghe mỗi ngày sẽ có tác dụng hữu ích. Mặc dù người ta không nói gì với em bé nhưng sau này nó vẫn trở thành một nghệ sĩ violon. Thật ra nhiều nhạc sĩ đã được 'tạo ra' bằng cách này.

* *

Có nhiều bằng chứng cho thấy việc không sử dụng các giác quan sẽ gây ra sự tổn thất. Người ta đã nghiên cứu những điều sẽ xảy ra, khi trong năm đầu tiên của cuộc đời, hệ tiền đình – cơ quan được sử dụng để phát hiện chuyển động và giữ thăng bằng – không

được sử dụng đầy đủ. Việc thiếu sự lắc lư sẽ làm cho ta khó mà bù đắp cho chúng sau này. Việc ít sử dụng xúc giác cũng nguy hiểm không kém. Trẻ em, giống như các động vật hữu nhũ con khác, nếu thiếu các kinh nghiệm tổng quát và có tính hệ thống này, sẽ ngả theo hướng có hành vi hung bạo trong phần còn lại của cuộc đời. Xem 37

* *

Điều quan trọng là các kênh ion trong cơ thể người không thể làm việc quá sức. Sự sai hỏng các kênh ion là nguyên nhân của sự nhiễm trùng, tiểu đường và nhiễm độc. Nhưng điều chủ yếu là các kênh ion và điện nói chung, rất quan trọng cho sự sống. Xem 38

* *

Cơ thể chúng ta chứa nhiều hệ thống ngăn ngừa các hậu quả xấu. Thí dụ, năm 2006 người ta đã khám phá ra nước bọt có chứa một chất giảm đau mạnh hơn morphine rất nhiều; hiện nay người ta gọi nó là *opiorphin*. Chúng giúp cho các vết bầm nhỏ trong miệng không làm cho ta quá khó chịu. Opiorphine cũng có tác dụng như chất chống trầm cảm. Các nghiên cứu trong tương lai phải chứng minh được là việc nghiện thực phẩm có liên hệ tới hoá chất này hay không.

* *

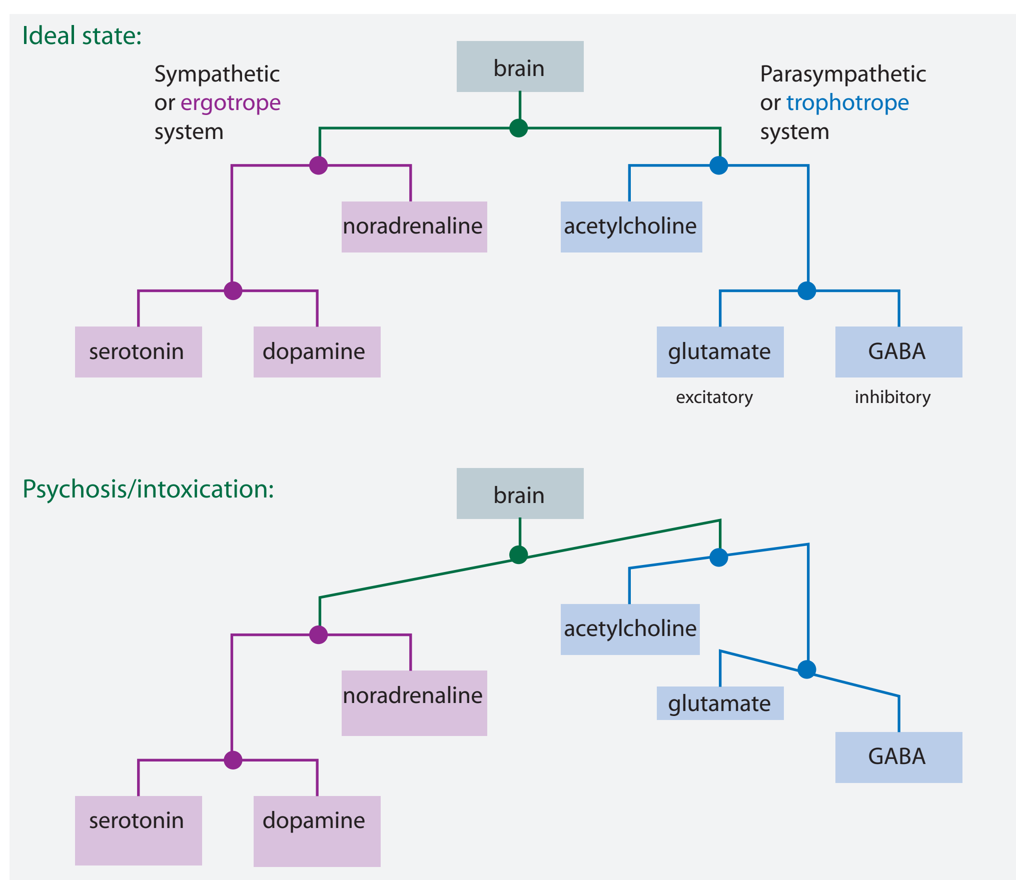
Người ta vẫn chưa biết tại sao con người – và các động vật hữu nhũ khác – lại *ngáp*. Chủ đề này vẫn đang được nghiên cứu.

* *

Thiên nhiên đã phát minh ra các giác quan để làm tăng sự hỷ lạc và tránh sự đau đớn. Nhưng các nhà thần kinh học nhận thấy rằng thiên nhiên đã đi xa hơn; có một *hệ hỷ lạc* dành riêng trong não, được trình bày trong Hình 16, có chức năng quyết định xem trải nghiệm nào mang lại niềm vui và trải nghiệm nào thì không. Phần chính của hệ hỷ lạc là *VTA* trong trung não và *NAcc* tiền não. Hai phần điều chỉnh lẫn nhau thông qua *dopamine* và *GABA*, hai chất dẫn truyền thần kinh quan trọng. Các nhà nghiên cứu đã thấy rằng dopamine được tạo ra khi sự hỷ lạc vượt quá mong đợi. Thiên nhiên đã phát triển một tín hiệu đặc biệt cho điều này.

Đúng ra hạnh phúc và hoan lạc được điều khiển bởi một số lớn các chất dẫn truyền thần kinh và nhiều dòng điện điều chỉnh phụ. Các nhà nghiên cứu đang cố gắng mô hình hoá hệ hỷ lạc bằng hàng trăm phương trình vi phân ghép với nhau, nhằm mục đích tìm hiểu về sự nghiện ngập và sự trầm cảm. Mặt khác, người ta cũng có thể tạo ra các mô hình đơn giản của hệ hỷ lạc. Một mô hình như đã thấy trong Hình 15, là mô hình 'Giàn treo hoá-thần kinh' của não. Trong mô hình này, người ta đạt được hạnh phúc khi 6 chất Xem 39 dẫn truyền thần kinh quan trọng nhất * ở trong trạng thái cân bằng tương đối. Các khả năng mất cân bằng khác nhau, tại khớp nối của giàn treo, thường được mô tả là sự trầm cảm, tâm thần phân liệt, loạn tâm thần, tác dụng của nicotine hay rượu, sự nghiện rượu, chứng hoang tưởng, sự nghiện ma tuý, sự giải độc, chứng động kinh và nhiều hơn nữa.

* Có nhiều loại chất dẫn truyền thần kinh. Có thể phân chúng thành các nhóm *mono- và diamines* – như dopamine, serotonin, histamine, adrenaline – *acetylcholine*, *amino acid* – như glycine, GABA và glutamate – *polypeptide* – như oxytocin, vasopressin, gastrin, opiod, neuropetides v.v... – *khí* – như NO và CO – và nhiều phân tử không thuộc nhóm nào – như anandamide hay NAAG.



HÌNH 15 Mô hình 'Giàn treo hoá-thần kinh' của hạnh phúc, kèm theo một thí dụ về sự mất cân bằng.

* *

Xem 40

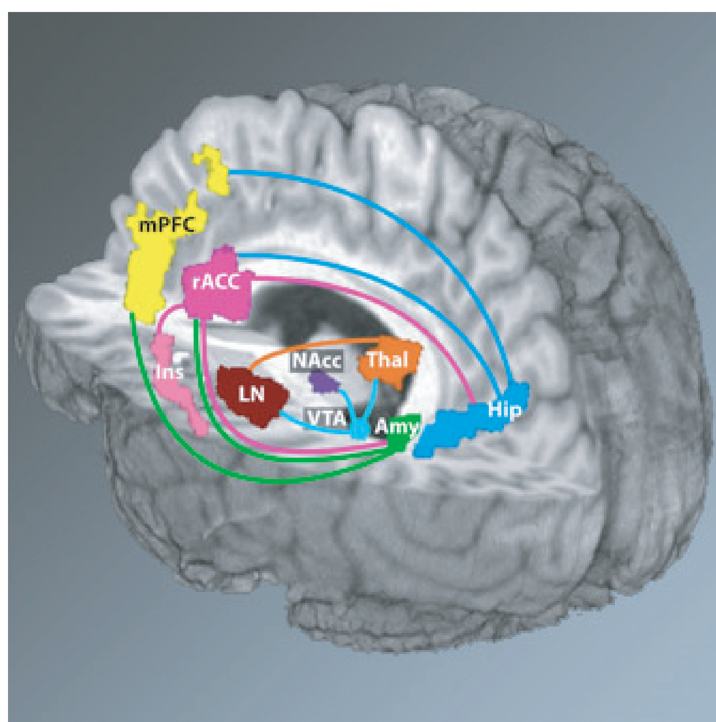
Không phải Hệ hỷ lạc trong não chỉ chịu trách nhiệm về sự nghiện ngập. Nó còn chịu trách nhiệm về tình yêu lãng mạn như Helen Fisher đã chứng minh qua việc chụp ảnh não bằng MRI. Tình yêu lãng mạn, hướng về một cá nhân khác, là một trạng thái được tạo ra trong VTA và trong NAcc. Như vậy tình yêu lãng mạn là một phần của não bò sát; thật vậy, tình yêu lãng mạn được thấy trong nhiều loại động vật. Tình yêu lãng mạn là một loại nghiện ngập tích cực và hoạt động giống như cocaine. Tóm lại, trong đời sống, ta có thể lựa chọn giữa nghiện ngập và tình yêu.

* *

Câu đố 33 s

Một mặt quan trọng của sinh là tử. Khi ta qua đời, các đại lượng bảo toàn như năng lượng, động lượng, moment động lượng và nhiều lượng tử số khác được tái phân bố. Chúng được tái phân bố vì bảo toàn có nghĩa là không có gì bị mất đi. Phần này nói lên điều gì về những việc xảy ra sau khi chết?

* *



HÌNH 16 Vị trí của vùng vỏ bụng (VTA - ventral tegmental area) và nhân kề vách (NAcc - nucleus accumbens) trong não. Những vùng khác có liên quan tới hỷ lạc và nghiện ngập là Amy, hạch hạnh nhân, Hip, hồi hải mã, Thal, đồi thị, rACC, vòng cung vỏ não trước, mPFC, vỏ não trung gian trước trán, Ins, thuỳ đảo, và LN, nhân bèo (courtesy NIH).

Chúng ta ai cũng biết mùi hương của một cánh đồng bát ngát khi một cơn mưa hạ nhẹ nhàng rơi xuống hay mùi hương của mặt đất mát mẻ, trong lành. Mùi hương này có nguồn gốc từ *geosmin*, một chất rượu hai vòng do vi khuẩn trong đất tạo ra khi trời mưa. Người ta vẫn chưa biết rõ vì sao mũi người lại nhạy một cách đặc biệt với mùi của geosmin: ta có thể ngửi thấy mùi của nó khi nồng độ nhỏ hơn 10^{-10}.

* *

Thực vật cũng có các cảm biến. Cây cối có thể cảm nhận được ánh sáng, sự tiếp xúc, trọng lực, hoá chất, cũng như điện trường và dòng điện. Nhiều cây tăng trưởng khác thường khi được chạm vào; rễ cây có thể cảm nhận, dẫn điện rồi phát triển nhanh chóng; điều hiển nhiên là cây tăng trưởng ngược chiều trọng lực và hướng về phía ánh sáng. Điều chủ yếu là cây có thể phân biệt nhiều loại hoá chất trong không khí, đặc biệt là ethene (ethylene), cũng là một hormone quan trọng của cây.

* *

Nhiều cây sở hữu các cảm biến và đồng hồ có thể đo được chiều dài của một ngày. Thí dụ *rau chân vịt* không phát triển trong vùng nhiệt đới, vì để ra hoa, rau phải trải qua ít nhất 14 ngày, ban ngày kéo dài ít nhất 14 giờ liên tiếp – và điều này không bao giờ xảy ra ở vùng nhiệt đới. Tính chất này được gọi là *hiện tượng quang chu kỳ*, do Wightman Garner

và Harry Allard khám phá vào năm 1920 trong khi đi bộ ngang qua những cánh đồng thuốc lá. Họ đã phát hiện – và chứng minh bằng thực nghiệm – rằng cây thuốc lá và đậu nành chỉ ra hoa khi chiều dài ban ngày đủ ngắn, tức là vào khoảng tháng 9. Garner và Allard cũng nhận thấy rằng thực vật có thể chia thành nhiều loài nở hoa khi ngày ngắn – như cây hoa cúc, cà phê – loại khác thì ra hoa khi ngày dài – như cây cẩm chướng, cỏ ba lá – và các loại không phụ thuộc chiều dài ban ngày – như hồng, cà chua. Độ chính xác của phép đo chiều dài ban ngày là khoảng 10 phút. Sau này người ta mới khám phá ra các cảm biến chiều dài ban ngày; nó nằm trong lá cây, được gọi là *hệ phytochrome* do các protein chuyên biệt tạo thành. Các protein này có thể đo được tỷ số giữa ánh sáng đỏ nhạt và đỏ đậm và kiểm soát thời điểm nở hoa của cây.

Tóm tắt về sinh học và niềm hoan lạc

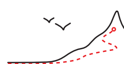
Để bảo đảm cho sự sinh sản của sinh vật, sự tiến hoá phải tiểu hình hoá hết mức. Động cơ phân tử, kể cả bơm phân tử, là những động cơ nhỏ nhất mà ta đã biết cho đến nay; chúng hoạt động giống như một bánh cóc lượng tử. Động cơ phân tử được tìm thấy rất nhiều trong mỗi tế bào sống. Tóm lại:

▷ Mỗi con người được tạo thành từ hàng tỷ tỷ cái máy.

Để tăng hỷ lạc và tránh khổ đau, sự tiến hoá đã cung cấp cho cơ thể người nhiều cảm biến, nhiều cơ cấu cảm biến và hệ hỷ lạc nằm sâu trong não bộ. Tóm lại, thiên nhiên đã phát minh ra *sự hỷ lạc* để hướng dẫn hành vi. Các nhà thần kinh học đã chứng minh điều mà Epicurus đã nói cách nay 23 thế kỷ và Sigmund Freud đã lặp lại cách nay 1 thế kỷ:

▷ Sự hỷ lạc điều khiển đời sống của con người.*

Mọi cảm biến hỷ lạc sinh học và hệ hỷ lạc đều dựa trên chuyển động lượng tử, đặc biệt là dựa trên Hoá học và Khoa học vật liệu. Do đó ta sẽ tìm hiểu cả hai lĩnh vực đó ngay sau đây.



* Nhưng Epicurus cũng nói rằng: 'Không thể có một cuộc sống hạnh phúc nếu không sống một cuộc sống thông minh, đức hạnh và chính trực, và không thể sống một cuộc sống thông minh, đức hạnh và chính trực nếu không có một cuộc sống đầy hỷ lạc.' Đây là một phát biểu trong tuyển tập *Principal Doctrines* của ông.

Chương 2

Thay đổi thế giới bằng các hiệu ứng lượng tử

Việc khám phácác hiệu ứng lượng tử đã làm thay đổi cuộc sống thường ngày. Nó góp phần vào việc phổ biến ngôn ngữ, âm nhạc và điện ảnh. Không thể có truyền thông, Internet, các tiến bộ về Hoá học, Khoa học vật liệu, Điện tử và Y học nếu không có các hiệu ứng lượng tử. Cuộc sống hằng ngày của chúng ta cũng bắt nguồn từ Vật lý lượng tử và người ta vẫn trông chờ nó được cải thiện thêm.

Hoá học – từ nguyên tử tới DNA

“Bier macht dumm.**”

Albert Einstein

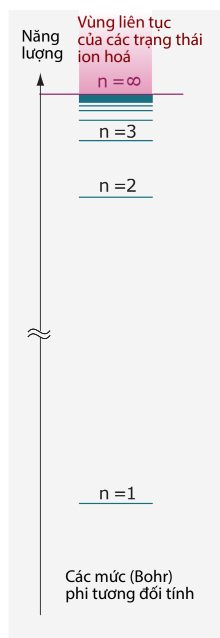
Phương trình Schrödinger chứa toàn bộ Hoá học đã là một chân lý cũ kỹ. Nhờ Thuyết lượng tử, lần đầu tiên người ta đã tính được cường độ của các liên kết hoá học, và quan trọng hơn, là góc giữa các liên kết. Như vậy Thuyết lượng tử giải thích được *hình dạng* của phân tử và một cách gián tiếp, hình dạng của vật chất. Đúng ra ta phải nói là: phương trình *Dirac* chứa toàn bộ Hoá học. Ta cần các hiệu ứng tương đối tính để phân biệt hai phương trình, khi tìm hiểu lý do vàng có màu vàng và không rỉ sét hay khi tìm hiểu lý do thuỷ ngân là chất lỏng. Xem 41

Để hiểu rõ các phân tử hay vật chất thông thường, bước đầu tiên là tìm hiểu các nguyên tử. Các nhà vật lý lượng tử trước kia, do Niels Bohr dẫn đầu, đã cống hiến cả cuộc đời để tìm hiểu về phân tử và cấu trúc chi tiết của chúng. Kết quả chính của các nỗ lực này là điều mà bạn đã học trong trường trung học: trong các nguyên tử có nhiều hơn một electron, các đám mây electron khác nhau tạo thành các lớp hình cầu bao quanh hạt nhân. Các lớp electron có thể được nhóm thành các đám mây có liên hệ với nhau gọi là các *lớp vỏ*. Đối với các electron bên ngoài lớp vỏ được lấp đầy sau cùng, hạt nhân và các lớp vỏ bên trong, *lõi* nguyên tử, thường được xem gần đúng là một thực thể tích điện.

Các lớp vỏ được đánh số từ trong ra ngoài. *Số lượng tử chính*, thường được viết là n, được suy ra từ lượng tử số xác định các trạng thái trong nguyên tử hydrogen. Mối liên hệ được biểu diễn trong Hình 17.

Thuyết lượng tử chứng tỏ rằng vỏ nguyên tử đầu tiên là chỗ của 2 electron, vỏ thứ 2 dành cho 8 electron, vỏ thứ 3 là 18 và vỏ thứ n là của $2n^2$ electron. Nguyên tử (trung hoà) có 1 electron là hydrogen, có 2 electron là helium. Mỗi nguyên tố hoá học có một số electron riêng (với cùng số proton, như ta sẽ thấy). Một cách minh hoạ cho sự kết nối

** ‘Bia làm cho người ta ngớ ngẩn.’



HÌNH 17 Lượng tử số trong nguyên tử hydrogen.

Xem 42 này được trình bày trong Hình 18. Đó là *Bảng tuần hoàn các nguyên tố*. Cách tiêu chuẩn để trình bày bảng này có ở Trang 345 và cách sinh động hơn là trong Hình 19. (Một bảng tuần hoàn có video cho từng nguyên tố, có ở trang www.periodicvideos.com.)

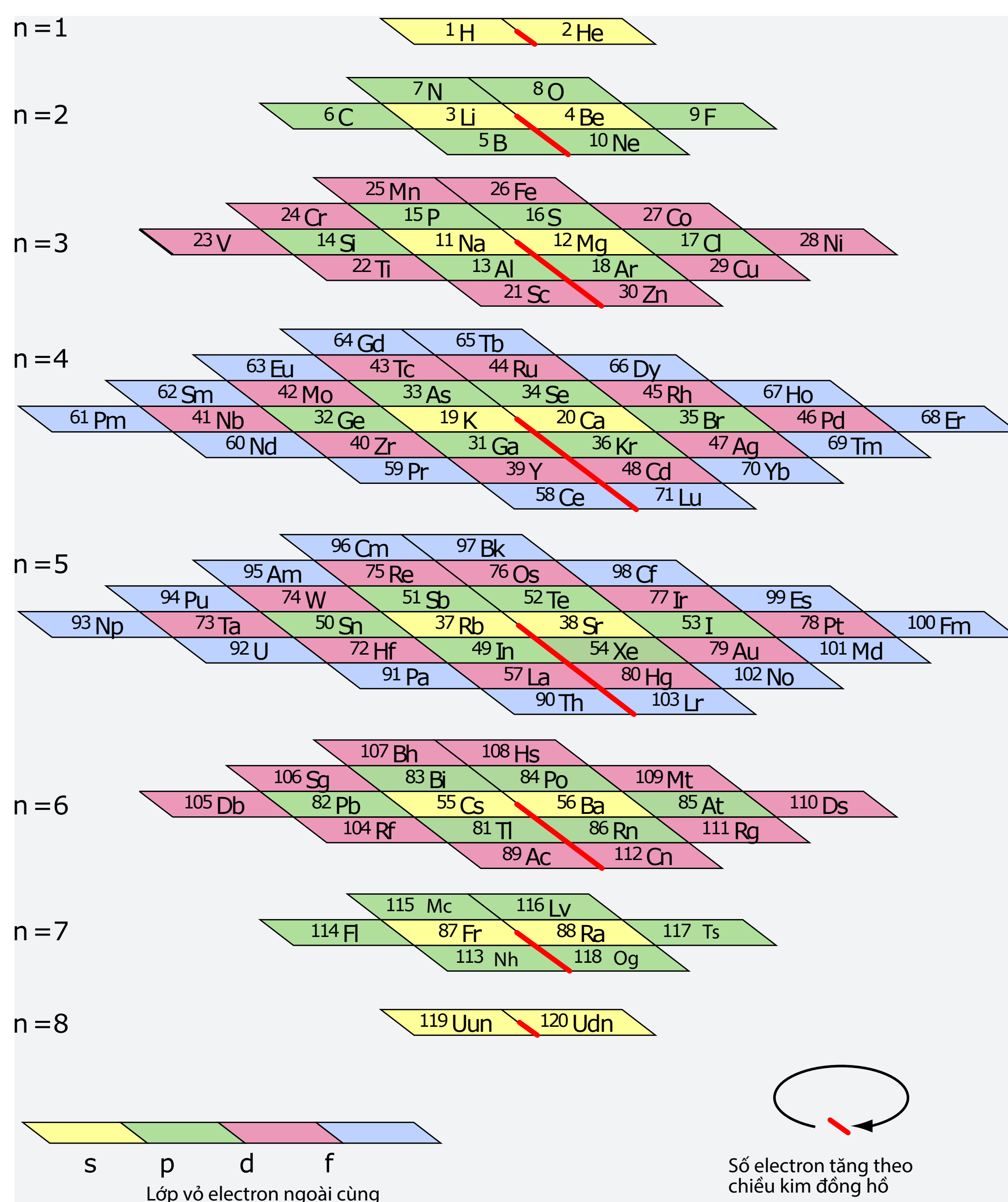
Các thí nghiệm đã chứng tỏ rằng các nguyên tử khác nhau có số electron ngoài cùng *giống nhau* sẽ có hoá tính *tương tự*. Các hoá học gia đã biết rằng hoá tính của một nguyên tố bắt nguồn từ các liên kết của nguyên tử. Thí dụ như các nguyên tố có 1 electron ở lớp s bên ngoài là *các kim loại kiềm* lithium, sodium, potassium, rubidium, caesium và francium; hydrogen, một ngoại lệ, được giả định là một kim loại khi áp suất cao. Các nguyên tố có lớp vỏ ngoài cùng được lấp đầy là *các khí hiếm* helium, neon, argon, krypton, xenon, radon và oganesson.

Liên kết nguyên tử

Khi 2 nguyên tử đến gần nhau, các đám mây electron của chúng bị biến dạng và hoà trộn với nhau. Tác dụng gắn kết của 2 hạt nhân đã gây ra sự thay đổi này. Sự thay đổi nhiều nhất xảy ra cho các electron ngoài cùng: chúng tạo nên *các liên kết* hoá học.

Ta có thể hình dung một cách gần đúng, các liên kết là sự xen phủ của các đám mây *lấp đầy* lớp vỏ ngoài cùng của cả 2 nguyên tử. Sự xen phủ này toả ra năng lượng. Năng lượng toả ra là lý do làm cho ngọn lửa nóng. Trong củi cháy, phản ứng hoá học giữa các nguyên tử carbon và oxygen giải phóng một số lớn năng lượng. Sau khi năng lượng được toả ra, liên kết hoá học tạo ra một khoảng cách cố định giữa các nguyên tử, như ta thấy trong Hình 20. Khoảng cách này bắt nguồn từ cực tiểu năng lượng: khoảng cách giảm sẽ làm phát sinh lực đẩy tĩnh điện giữa 2 lõi nguyên tử, khoảng cách tăng sẽ làm tăng năng lượng của đám mây electron.

Nhiều nguyên tử có thể liên kết với nhiều 'hàng xóm'. Trong trường hợp này, sự cực



HÌNH 18 Một dạng khác thường của Bảng tuần hoàn các nguyên tố.

tiểu hoá năng lượng sẽ dẫn tới các góc liên kết đặc biệt, như ta thấy trong Hình 21. Có lẽ bạn còn nhớ các hình ảnh vui mắt khi học hoá ở trường trung học của các vân đạo và các liên kết đong đưa. Bây giờ người ta đã có thể quan sát và đo được các liên kết đong đưa như vậy. Người ta đã chụp được ảnh của chúng bằng cách sử dụng kính hiển vi lực quét hay kính hiển vi hiệu ứng xuyên hầm quét, như ta thấy trong Hình 22.

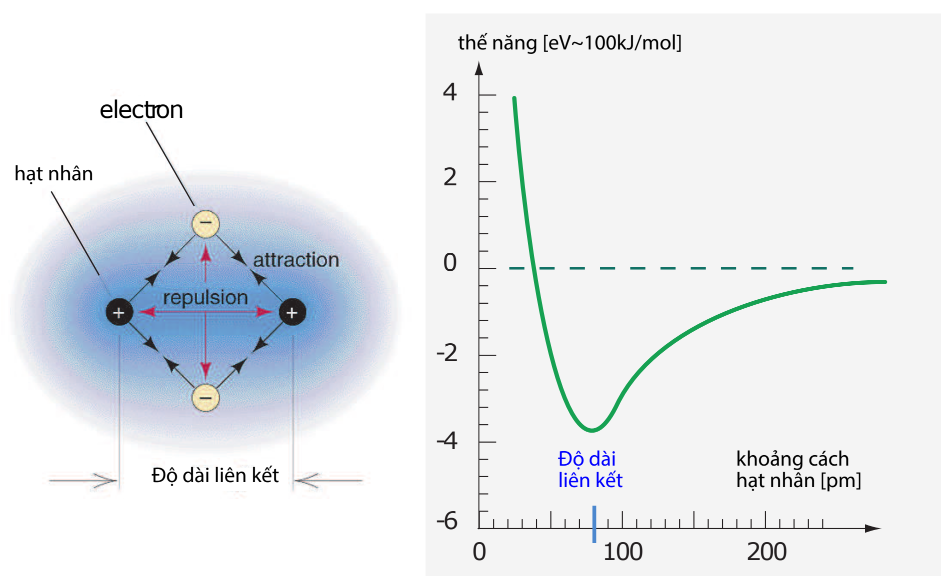
Xem 43

Xem 44

Lực đẩy giữa các đám mây liên kết giải thích lý do tại sao ta thường gặp các góc gần bằng với góc của khung tứ diện ($2 \arctan \sqrt{2} = 109.47°$) trong các phân tử. Thí dụ như góc H–O–H trong phân tử nước là 107°.

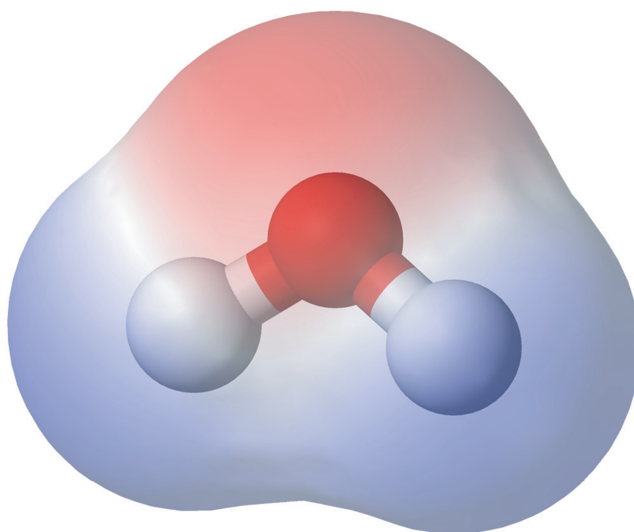
Câu đố 34 e

HÌNH 19 Một bảng tuần hoàn các nguyên tố hiện đại (© Theodore Gray, có bán tại www.theodoregray.com).



HÌNH 20 Sự thành lập một liên kết hoá học giữa 2 nguyên tử và cực tiểu năng lượng liên quan (hình bên trái © chemistry4gcms2011.wikispaces.com).

Các nguyên tử cũng thường được nối với nhau bằng các *đa* liên kết. Liên kết đôi xuất hiện trong carbon dioxide, hay CO_2, do đó nó thường được viết là O = C = O, liên kết 3 xuất hiện trong carbon monoxide, CO, thường được viết là C ≡ O. Cả hai loại liên kết này thường gặp trong hợp chất hữu cơ. (Thêm nữa, vòng lục giác nổi tiếng của phân tử benzene C_6H_6, giống như các hợp chất khác, có liên kết một rưỡi.) Các liên kết bậc cao hơn cũng có tuy ít gặp; liên kết 4 xuất hiện trong các nguyên tử kim loại chuyển tiếp như rhenium hay tungsten. Các công trình nghiên cứu cũng cho ta thấy rằng phân tử



HÌNH 21 Hình minh hoạ các góc của liên kết hoá học liên quan tới nhiều nguyên tử: trong một phân tử nước, sự phân bố điện tích bắt nguồn từ các liên kết cộng hoá trị, màu xanh ở 2 đầu chỉ điện tích dương, và màu đỏ ở trên chỉ điện tích âm. Phần bên trong biểu diễn một cấu trúc điển hình của phân tử nước © Benjah-bmm27).

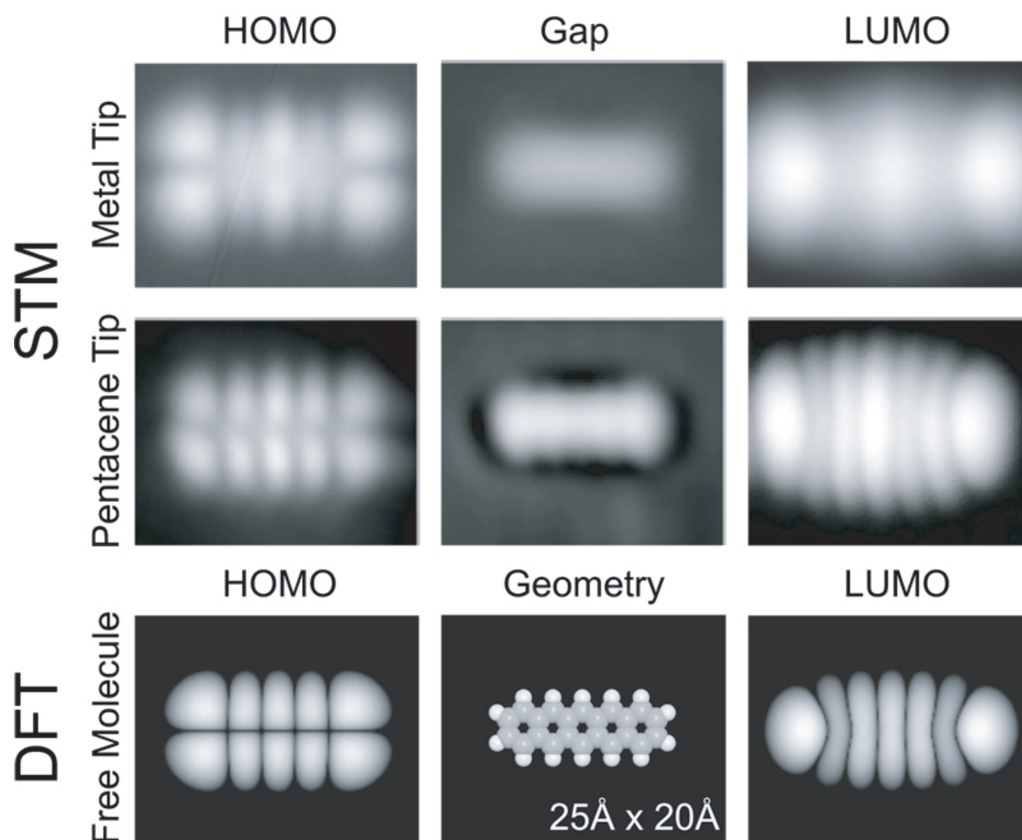
Xem 45 uranium U_2, có liên kết 5 và phân tử tungsten W_2 có liên kết 6.

Acid Ribonucleic và acid deoxyribonucleic

Có lẽ phân tử quyến rũ nhất trong tất cả các phân tử là acid deoxyribonucleic của người, được biết với tên viết tắt là DNA. Acid nucleic được bác sĩ Friedrich Miescher (b. 1844 Basel, d. 1895 Davos) khám phá trong bạch huyết cầu năm 1869. Ông cũng tìm thấy nó trong nhân tế bào và gọi nó là chất 'Nuklein'. Năm 1874, ông công bố một bài nghiên cứu quan trọng để chứng minh rằng phân tử này được chứa trong tinh trùng và bàn luận về vấn đề chất này có liên quan đến sự di truyền hay không. Bằng công trình này, Miescher đã mở đường cho lĩnh vực nghiên cứu đã đem lại cho các đồng nghiệp các giải Nobel (dù ông không được nhận vì ông đã qua đời trước khi giải được thành lập). Chất này được đổi tên thành 'acid nucleic'.

DNA như ta thấy trong Hình 23, là một polymer. Polymer là một phân tử do nhiều đơn vị giống nhau tạo thành. Đúng ra DNA là phân tử dài nhất trong các phân tử mà người ta đã biết. Phân tử DNA của người, có thể dài tới 5 cm. Trong mỗi tế bào của người có 46 nhiễm sắc thể. Nói cách khác, trong mỗi tế bào của người có các phân tử với tổng chiều dài là 2 m. Cách thiên nhiên lưu giữ chúng mà không bị rối hay thắt gút là một đề tài thú vị. Mọi phân tử DNA đều gồm có một chuỗi xoắn kép chất dẫn xuất từ đường, gắn với nhau bằng 4 acid nucleic theo một thứ tự đặc biệt. Ngày nay, người ta đã có thể Xem 46 tạo ra các hình ảnh phân tử DNA; một thí dụ được trình bày trong Hình 24.

Đến đầu thế kỷ 20 thì Desoxyribonukleinsäure (DNS) – dịch sang tiếng Anh là deoxyribonucleic acid (DNA) – đúng là chất mà Erwin Schrödinger đã tiên đoán trong quyển sách của ông có tựa *Đời sống là gì?* Là thành phần chính của nhiễm sắc thể nằm trong nhân tế bào, DNA chịu trách nhiệm cho việc lưu trữ và tái sản xuất thông tin về cấu trúc và chức năng của Sinh vật nhân thực. Thông tin được mã hoá theo thứ tự của 4 acid nucleic. DNA là vật mang thông tin di truyền. DNA xác định phần lớn phương thức



HÌNH 22 Hai hàng trên: các liên kết hoá học đo được trong phân tử pentacene bằng cách sử dụng nhiều kỹ thuật khác nhau; hàng dưới: các tính toán lý thuyết và minh hoạ của cùng thí nghiệm (© IBM).

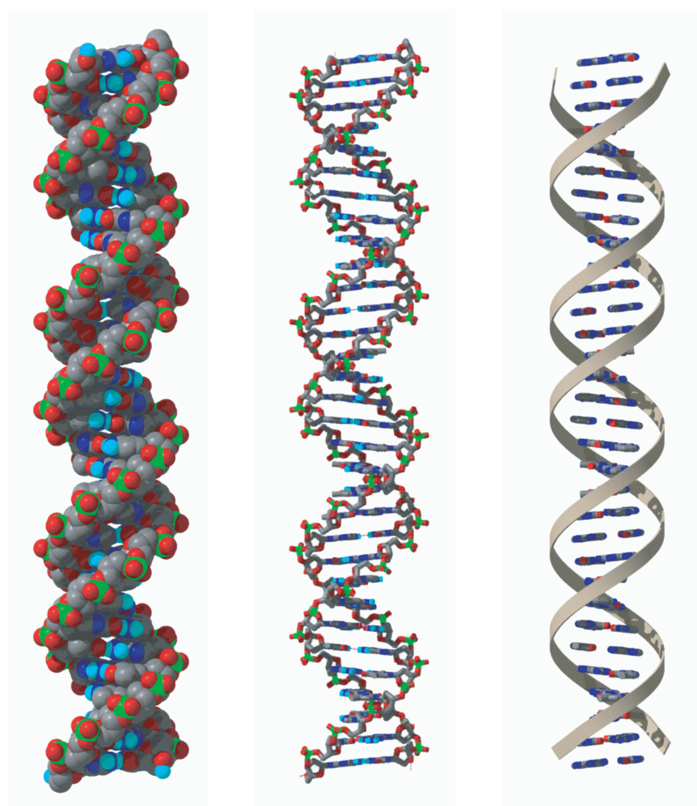
mà một tế bào đơn lẻ - chúng ta lúc ban đầu - phát triển thành một bộ máy có nhân tính phức tạp - chúng ta khi trưởng thành. DNA xác định màu tóc, khả năng mắc một bệnh nào đó, kích thước cực đại của người, v.v... Trong các phân tử mà ta đã biết, DNA có mối liên hệ mật thiết nhất với sự hiện hữu của con người. Kích thước lớn của nó là lý do ta cần nhiều thế hệ khoa học gia dành cho công việc tìm hiểu tường tận cấu trúc và chức năng của nó.

Để trải nghiệm các điều kỳ diệu của DNA, hãy xem các phim hoạt hình về việc sao chép DNA và các quá trình phân tử khác tại website độc nhất vô nhị www.wehi.edu.au/education/wehitv.

Các câu đố vui và lạ về hoá học

Giữa các đề tài hấp dẫn của hoá học là sự nghiên cứu các chất ảnh hưởng đến con người: Độc chất học nghiên cứu về *chất độc*, Dược lý học nghiên cứu về *thuốc* (y dược) và Nội tiết học nghiên cứu về *hormone*.

Người ta đã biết trên 50 000 chất độc, bắt đầu từ nước (thường gây tử vong khi được uống với lượng lớn hơn 10 l) và muối ăn (gây tử vong khi ăn 100 g) hay polonium 210



HÌNH 23 Có nhiều cách hình dung B-DNA, tất cả đều không đúng màu thực (© David Deerfield).

(gây tử vong với liều nhỏ cỡ 5 ng, nhỏ hơn một hạt bụi). Nhiều quốc gia có cơ sở dữ liệu về chất độc có thể truy cập rộng rãi; hãy tham khảo trang www.gsbl.de.

Bạn có biết tại sao 'Độc chất học', khoa học về chất độc, có nghĩa là 'Khoa học về cung tên' trong tiếng Hy Lạp không? Đúng ra không phải mọi chất độc đều là hoá chất. Paraffin và dầu hôi chẳng hạn, thường làm trẻ em tử vong khi nếm phải nó vì dầu vào trong phổi sẽ tạo ra một màng mỏng trên các phế nang, cản trở sự lưu thông của oxygen. Triệu chứng này được gọi là *viêm phổi do lipid* có thể gây tử vong dù chỉ có *một giọt* dầu trong miệng rồi sau đó được hít vào phổi. Không nên để Paraffin trong nhà có trẻ em.

Câu đố 35 e

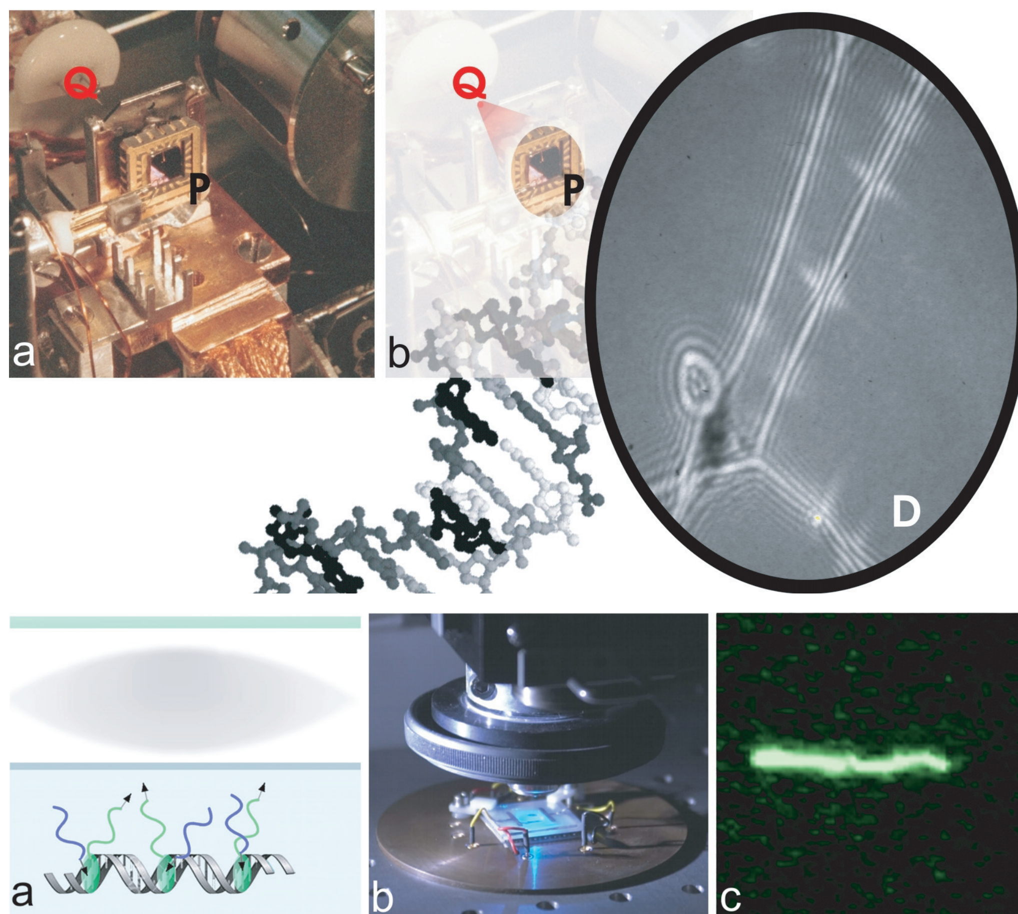
Trong thập niên 1990, nhà sinh vật học Binie Ver Lipps khám phá ra một chất, một polypeptide có thể chống nọc rắn và các động vật có nọc độc khác. Các công ty dược phẩm trên thế giới không bán chất này – nó có thể cứu được nhiều sinh mạng – vì nó quá rẻ.

* *

Một chất có là chất độc hay không tuỳ thuộc vào động vật tiếp nhận nó. Chocolate là độc chất đối với chó nhưng với trẻ em thì không. Ốc sên ăn được nấm độc; nấm nhai được không phải là dấu hiệu có thể ăn được.

* *

Hormone là các chất phát tín hiệu được sản xuất trong cơ thể người. Về mặt hoá học



HÌNH 24 Hai cách chụp ảnh các phân tử DNA đơn lẻ: bằng toàn ký với các electron được phát ra từ các đầu nhọn cỡ nguyên tử (hình trên) và bằng phương pháp hiển vi huỳnh quang, với kính hiển vi quang học thương mại (hình dưới) (© Hans-Werner Fink/Wiley VCH).

chúng có thể là peptide, lipid hay monoamine. Hormone làm thay đổi tâm trạng, gây ra các phản ứng hiếu chiến, mơ mộng hay trầm lắng, kích thích sự tăng trưởng, khởi phát sự dậy thì, kiểm soát sự sinh tử và lão hoá của tế bào, kích hoạt hay kiềm chế hệ miễn dịch, điều hoà chu kỳ sinh sản và kích hoạt sự đói khát và ham muốn tình dục.

* *

Khi ta trộn 50 ml nước cất với 50 ml ethanol (rượu), thể tích của hỗn hợp ít hơn 100 ml.
Câu đố 36 s Tại sao?

* *

Tại sao chất *hữu cơ* tức là chất chứa nhiều nguyên tử carbon thường cháy ở nhiệt độ thấp
Câu đố 37 ny hơn chất *vô cơ* như nhôm hay magnesium?

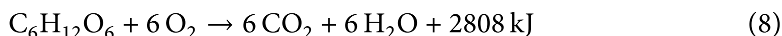
* *

Một khối lập phương đường không cháy nhưng nếu bạn đặt một ít tàn thuốc lên đỉnh của nó thì nó sẽ cháy. Tại sao?
Câu đố 38 ny

* *

Đường là chất cốt yếu của sự sống. Một loại đường đơn giản nhất là *glucose*, còn được gọi là *dextrose* hay *đường nho*. Glucose là một *monosaccharid*, khác với đường mía, là một disaccharid, hay tinh bột là một polysaccharid.

Sự tiêu hoá glucose và sự đốt cháy glucose có phản ứng hoá học giống nhau:



$$C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 \rightarrow 6\,CO_2 + 6\,H_2O + 2808\,\text{kJ} \tag{8}$$

Đây là phản ứng chính và đơn giản nhất cung cấp nhiên liệu cho các hoạt động của cơ và não trong cơ thể chúng ta. Phản ứng này cũng là lý do khiến ta phải ăn, mặc dù ta ngừng tăng trưởng về mặt kích thước. Sự cần thiết của Oxygen O_2 là lý do ta phải hít vào và carbon dioxide, CO_2 là lý do ta thở ra. Đời sống, khác với lửa, có thể 'đốt' đường ở 37°C. Đó là một trong những kỳ quan vĩ đại của thiên nhiên. Bên trong các tế bào, năng lượng thu được từ sự tiêu hoá đường được biến đổi thành adenosinetriphosphate (ATP) và sau đó được biến đổi thành chuyển động của các phân tử.

* *

Phản ứng hoá học có thể chậm nhưng vẫn nguy hiểm. Thuỷ ngân đổ lên nhôm sẽ tạo ra một hỗn hống làm giảm độ bền của nhôm sau một thời gian. Đó là lý do việc mang nhiệt kế thuỷ ngân lên phi cơ bị cấm triệt để.

* *

Nhờ một số hiệu ứng, hai nguyên tử có thể tạo thành một liên kết; liên kết này yếu hơn liên kết electron. Một liên kết nổi tiếng là trạng thái liên kết giữa 2 nguyên tử natrium cách nhau khoảng 60 bán kính Bohr, lớn hơn khoảng cách liên kết thông thường. Liên kết này bắt nguồn từ sự trao đổi liên tục một photon giữa 2 nguyên tử.
Xem 47

* *

Điều gì sẽ xảy ra khi bạn lấy bột potassium iodide trắng – KI – bột nitrate chì trắng – $Pb(NO_3)_2$ – rồi trộn chúng bằng một máy xay? (Việc này cần có sự bảo vệ và giám sát cẩn thận.)
Câu đố 39 s

* *

Viết lên giấy bằng viết chứa nước chanh thay cho mực sẽ tạo ra các văn bản vô hình. Sau đó, để đọc được chữ viết ta có thể hơ giấy trên đầu một ngọn nến.

* *

Nồng độ *ozone*, công thức hoá học là O_3, được duy trì trên thượng tầng khí quyển như thế nào? Người ta phải mất nhiều năm nghiên cứu để chứng tỏ rằng chất làm lạnh được sử dụng trong tủ lạnh, fluoro-chloro-hydrocarbon hay FCHC, đã phá huỷ dần lớp khí quan trọng này. Sự suy giảm ozone đã làm tăng tỷ lệ ung thư da trên thế giới. Bằng cách cấm chất nguy hiểm này, người ta hy vọng nồng độ ozone có thể hồi phục. Kết quả ban đầu thật đáng khích lệ. Năm 1995, Paul Crutzen, Mario Molina và Sherwood Rowland

đã nhận được giải Nobel hoá học nhờ các nghiên cứu dẫn tới các kết quả và các thay đổi về chính sách này.

* *

Năm 2008, người ta đã chứng tỏ rằng việc tiêm truyền chất *etanercept*, làm giảm hội chứng Alzheimer của một bệnh nhân Alzheimer khởi phát muộn, trong vài phút. Việc chữa bệnh Alzheimer là một trong những thách thức lớn đối với nền y học hiện đại. Năm 2013, Jens Pahnke nhận thấy rằng chất chiết xuất từ cây *Hypericum* có tác dụng tích cực đối với sự nhận thức và ký ức của bệnh nhân Alzheimer. Chất này đã là dược phẩm miễn phí, cho các mục đích sử dụng khác, có tên LAIF900.

* *

Cyanoacrylate là một chất kỳ lạ. Nó là thành phần chính trong keo dính nhanh, keo khô chỉ trong vài giây. Mùi của cyanoacrylate bốc hơi thì rất nồng mà người sử dụng keo này
Xem 48
đều biết. Hơi này còn một công dụng khác: chúng làm cho dấu vân tay hiện rõ. Bạn có
Câu đố 40 e
thể thử làm ở nhà xem sao!

* *

Pháo bông quyến rũ ở nhiều phương diện. Thách thức lớn nhất trong công nghệ pháo bông là tạo ra màu xanh lục của rừng cây. Các nhà sản xuất vẫn đang tìm lời giải của bài toán này. Để có thêm thông tin về pháo bông, hãy ghé thăm website cc.oulu.fi/~kempmp.

Khoa học vật liệu

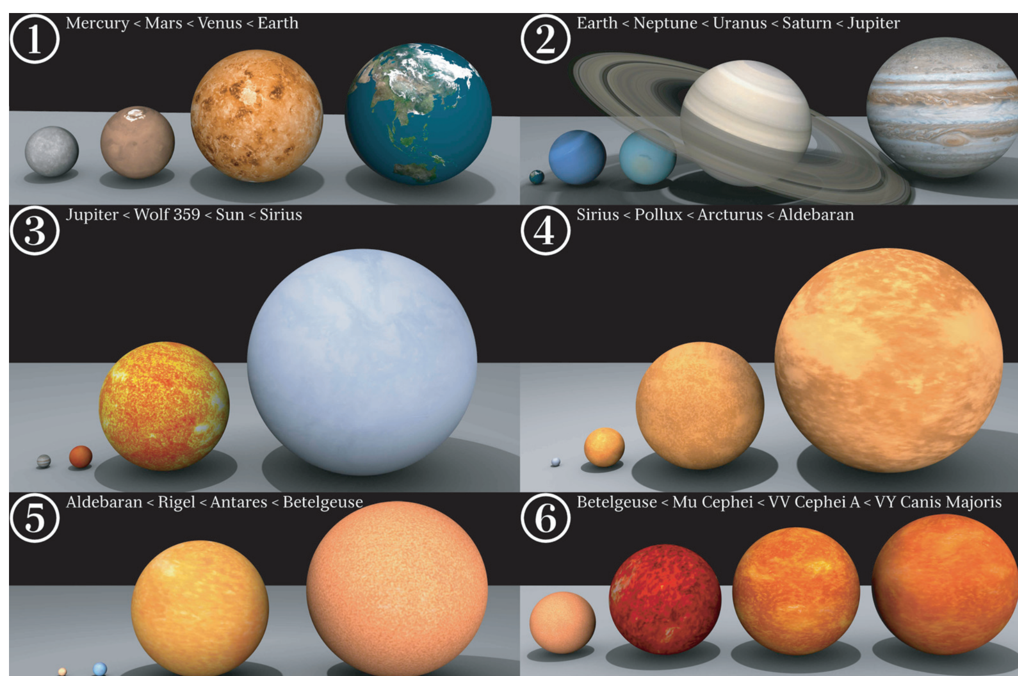
> "Bạn có biết rằng người ta không thể sử dụng trứng luộc để làm tăm không?"
>
> Karl Valentin

Chúng ta đã nói nhiều lần rằng lượng tử tác dụng có thể giải thích cho mọi tính chất của vật chất. Nhiều nhà nghiên cứu trong lĩnh vực Vật lý, Hoá học, Luyện kim, Kỹ thuật, Toán học và Sinh học đã hợp tác trong việc chứng minh cho điều này. Trong hành trình lên đỉnh ta chỉ còn chút ít thời gian để thám hiểm chủ đề hấp dẫn nhưng mênh mông này.

Tại sao sàn nhà không rơi xuống?

Chúng ta không rơi xuyên qua ngọn núi mà ta đang leo lên. Một số tương tác đã giữ cho ta không rơi. Đến lượt các lục địa giữ cho núi không rơi. Magma lỏng trong ruột Trái đất giữ cho các lục địa không chìm. Tất cả phát biểu có thể tóm tắt thành hai ý: Một, các nguyên tử không xuyên qua nhau: dù chúng gần như là các đám mây rỗng nhưng các nguyên tử vẫn giữ khoảng cách. Hai, các nguyên tử không thể nén được. Cả hai tính chất đều bắt nguồn từ nguyên lý loại trừ Pauli giữa các electron. Bản chất fermion của
Quyển IV, trang 137
electron không cho các nguyên tử trên Trái đất xuyên qua nhau.

Đúng ra không phải tất cả sàn nhà đều nâng lên do bản chất fermion của electron. Các nguyên tử cũng không phải không thể xuyên qua nhau. Nếu áp suất đủ lớn, các nguyên tử sẽ suy sụp tạo nên một loại sàn mới. Các sàn như vậy không có trên Trái đất. Nhiều người đã mất cả đời để tìm hiểu tại sao các sàn khác, cụ thể là *mặt các ngôi sao*,



HÌNH 25 So sánh kích thước của các ngôi sao (© Dave Jarvis).

không rơi xuống, hay khi rơi xuống, nó đã xảy ra như thế nào.

Các tấm sàn và kích thước của các thiên thể đều bắt nguồn từ các hiệu ứng lượng tử. Hình 25 minh hoạ kích thước của các thiên thể đã được tìm thấy. Trong mỗi vật thể, hiệu ứng lượng tử sẽ tạo ra một nội áp suất làm cho sàn và kích thước của vật thể cố định.

Trong các hành tinh rắn hay lỏng, kích thước của chúng là do tính không nén được của vật chất ngưng tụ và tính này lại bắt nguồn từ nguyên lý loại trừ Pauli. Nội áp suất hiệu dụng của vật chất ngưng tụ thường được gọi là *áp suất Pauli*. Trong hành tinh khí, như Mộc tinh và các *ngôi sao thông thường*, như trong Mặt trời, áp suất khí đóng vai trò của tính không nén được của chất rắn và chất lỏng của các hành tinh nhỏ. Áp suất khí bắt nguồn từ nhiệt lượng chứa trong các vật thể và nhiệt lượng thường toả ra từ các phản ứng hạt nhân bên trong vật.

Áp suất ánh sáng nhận trách nhiệm trong việc xác định kích thước của các sao *kềnh đỏ*, như Betelgeuse; nhưng đối với các sao trung bình, áp suất của ánh sáng có thể bỏ qua.

Các hiệu ứng lượng tử khác xuất hiện trong các ngôi sao có *mật độ cao*. Khi áp suất ánh sáng, khí áp và áp suất điện tử Pauli không thể giữ cho các nguyên tử xuyên vào nhau, các nguyên tử sẽ bị nén lại cho đến khi các electron được ép vào trong proton. Proton lúc đó trở thành neutron và cả ngôi sao có mật độ như hạt nhân nguyên tử, cụ thể là khoảng $2.3 \cdot 10^{17}$ kg/m^3. Một giọt vật chất sẽ nặng khoảng 200 000 tấn. Trong các *sao neutron* này, sàn – hay đúng hơn, kích thước – cũng được xác định bởi áp suất Pauli
Trang 186 nhưng đó là áp suất Pauli giữa các neutron, do các tương tác hạt nhân kích khởi. Các sao neutron này có bán kính khoảng 10 km.

Nếu áp suất tăng thêm, sao sẽ trở thành một *hố đen* và không bao giờ ngừng suy sụp.

Hố đen không có sàn; tuy vậy chúng vẫn có một kích thước không đổi, được xác định bởi đường chân trời.
Quyển II, trang 267

Câu hỏi liệu có các loại sao khác trong thiên nhiên, có một cơ chế hình thành sàn khác – như các *ngôi sao quark* giả định – hay không, vẫn còn được tìm hiểu.

ĐÁ TẢNG VÀ ĐÁ CUỘI

Nếu một nhà địa chất cầm một viên đá trong tay và ngắm nghía, ông ta có thể xác định được tuổi của nó, với sai số vài phần trăm. Câu chuyện đầy đủ đằng sau khả năng đáng kinh ngạc này tạo thành một phần lớn của Địa chất học, nhưng các nhà vật lý cũng nên biết một vài kiến thức tổng quát.

Nói một cách tổng quát, mật độ của Trái đất giảm từ tâm đến bề mặt. Lớp *mantle trên*, nằm dưới lớp vỏ cứng của Trái đất, phần lớn được tạo thành từ *peridotite*, một loại đá hoả sinh đặc, mật độ khoảng 3.3 g/cm^3. Lớp *vỏ đại dương*, bề dày khoảng từ 5 đến 10 km, chủ yếu là đá hoả sinh như basalt, diabase và gabbro. Các loại đá này ít đặc hơn, mật độ khoảng 3 g/cm^3 và có tuổi khoảng 200 triệu năm. Lớp *vỏ đại lục* dày khoảng từ 30 tới 50 km, bao gồm các loại đá nhẹ hơn, mật độ khoảng 2.7 g/cm^3, như granite. Tuổi của lớp này thay đổi nhiều; tính trung bình tuổi của nó khoảng 2000 triệu năm, là đá rất trẻ, tới đá già hơn, có tuổi khoảng 4300 triệu năm. Lớp vỏ đại lục chứa nhiều nguyên tố không tương hợp.

Mỗi viên đá trong tay chúng ta đều trải qua các *chu trình đá*. Chu trình đá chính là một quá trình biến đổi magma từ bên trong Trái đất thành *đá hoả sinh* thông qua hiện tượng nguội dần và kết tinh. Đá hoả sinh, như basalt, có thể biến đổi do sự xâm thực, vận chuyển và bồi tích thành *đá trầm tích*, như sa thạch. (Đá trầm tích cũng có thể được tạo thành từ vật liệu có nguồn gốc sinh vật). Cả hai loại đá này đều có thể bị biến đổi do áp suất hay nhiệt độ cao để thành *đá biến chất*, như cẩm thạch. Sau cùng, phần lớn các loại đá – thường nhưng không luôn luôn – được biến đổi trở lại thành magma.

Chu trình đá chính kéo dài khoảng từ 110 tới 170 triệu năm. Vì lý do này, ta ít gặp đá già hơn trên Trái đất. Một viên đá bất kỳ mà ta lượm được khi đi dạo là sản phẩm của sự xâm thực của một trong các loại đá kể trên. Một nhà địa chất chỉ cần nhìn đã có thể nói tên loại đá; nếu ông ta thấy hay biết môi trường nguyên thuỷ của nó, ông ta có thể cho biết tuổi và quá trình sinh tạo mà không cần phòng thí nghiệm.

Trong thời gian hàng triệu năm, khoáng chất nổi lên từ lớp mantle hay bị chìm xuống dưới lớp vỏ, thường bị nhiệt và áp suất làm thay đổi; chúng sẽ hoà tan hay trầm hiện và sẽ có mặt nhiều ở một nơi nào đó. Những câu chuyện hấp dẫn về khoáng chất này đã được các nhà địa chất tìm hiểu kỹ càng. Các nhà địa chất có thể nói nơi để tìm ra các bãi biển có cát màu lục (được tạo ra từ olivine); họ có thể nói cách mà đá vôi trầm tích tiếp xúc với đá hoả sinh nóng chảy để tạo ra cẩm thạch, ruby và các loại đá quý khác, kèm theo các điều kiện chính xác; họ cũng có thể nói cho ta biết, từ các tinh thể nhỏ thạch anh bao quanh coesite từ thuở xa xưa, đá đã chịu một áp suất rất lớn – do ở dưới độ sâu cỡ 70 km, hay do sự va chạm của các thiên thạch hay do các vụ nổ nguyên tử.
Xem 49

Theo quan điểm của Khoa học vật liệu, đá là hỗn hợp các khoáng chất. Mặc dù có hơn 5000 loại khoáng chất nhưng chỉ có khoảng 200 loại tạo thành đá. Những loại khoáng chất tạo nên đá này có thể nhóm thành vài loại tổng quát. Nhóm chính là các loại đá chứa nhiều silica. Chúng chứa SiO_4 và tạo nên 92 % đá. 8 % đá còn lại có thành phần khác, như carbonate hay oxide. Bảng 5 cung cấp thêm một số thông tin. Bảng



HÌNH 26 Đá hoả sinh (3 hàng trên): gabbro, andesite, permatite, basalt, đá bọt, porphyry, obsidian, granite, tuff; đá trầm tích (hàng giữa): đất sét, đá vôi, sa thạch; và (hàng dưới) 2 mẫu đá biến chất: cẩm thạch (© Siim Sepp at www.sandatlas.org, Wikimedia).

BẢNG 4 Các loại đá tảng và đá cuội.

Loại chính	Tính chất	Loại con	Thí dụ
Đá hoả sinh (magmatites)	được tạo thành từ magma, 95 % của các loại đá	núi lửa hay phun trào	basalt (đáy biển, Giant's Causeway), andesite, đá vỏ chai
		thể xâm nhập	đá hoa cương, gabbro
Đá trầm tích (sedimentites)	thường ở chung với hoá thạch, vài %	vụn ngoại sinh	đá phiến sét, đá bột kết, sa thạch
		nguồn gốc sinh vật	đá vôi, phấn, dolostone
		trầm hiện	thạch diêm, thạch cao
Đá biến chất (metamorphites)	bị biến đổi do nhiệt và áp suất, vài %	dạng lá	đá phiến lớp, đá phiến, đá phiến ma (Himalayas)
		không có dạng lá (grandoblastic hay hornfelsic)	cẩm thạch, skarn, quartzite
Thiên thạch	từ Thái dương hệ	thiên thạch đá	
		thiên thạch sắt	

này bao gồm các khoáng chất tìm thấy trên vỏ Trái đất. Tuy vậy khoáng chất thông dụng nhất là *Bridgmanite*, một dạng của $MgSiO_3$. Khoảng 1/3 Trái đất được tạo thành từ Bridgmanite, một silicate perovskite; nó được tạo nên trong lớp mantle dưới, ở nhiệt độ khoảng 1800°C và áp suất trên 24 GPa. Người ta không bao giờ tìm thấy khoáng chất này trên vỏ Trái đất. Các nghiên cứu gần đây cho rằng một số dạng của Bridgmanite có
Xem 50
thể đã hợp với oxigen trong khí quyển khi nó nổi lên trên do sự đối lưu.

Theo quan điểm hoá học, đá có vẻ thuần nhất hơn. 99 % đá được tạo thành từ 9 nguyên tố. Bảng 6 cho thấy điều này.

Hầu hết các khoáng chất có dạng tinh thể. *Tinh thể* là chất rắn có các nguyên tử được sắp xếp một cách đều đặn và cũng là một chủ đề hết sức hấp dẫn.

Sự kết tinh

Bạn đã từng ngắm một tinh thể thạch anh hay một chất kết tinh nào khác chưa? Hình dạng xinh xắn và cách sắp xếp các nguyên tử đã hình thành một cách tự phát, do chuyển động của các nguyên tử dưới nhiệt độ và áp suất cao, trong thời gian vật liệu còn nằm sâu dưới mặt đất. Chi tiết của sự kết tinh thì phức tạp nhưng thú vị.

Có phải các mạng tinh thể đều đặn này *đã tối ưu về mặt năng lượng* không? Câu hỏi đơn giản này dẫn tới một núi vấn đề. Ta có thể khởi đầu bằng một câu hỏi đơn giản hơn nhiều là các quả cầu được bó chặt đã *dày đặc* hết mức chưa. Mật độ chất là $\pi/\sqrt{18}$, tức là
Câu đố 41 s
lớn hơn 74 % một chút. Mặc dù con số này đã được Johannes Kepler giả định là con số
Xem 51
lớn nhất vào năm 1609 nhưng nó chỉ mới được Tom Hales chứng minh vào năm 1998. Chứng minh điều này rất khó vì trong một thể tích nhỏ thì khả năng xếp chặt các quả cầu lên đến 78 %. Việc chứng minh với các thể tích lớn thì giá trị đó sẽ nhỏ đi là một

BẢNG 5 Thành phần khoáng vật học của đá tảng và đá cuội trong lớp vỏ Trái đất.

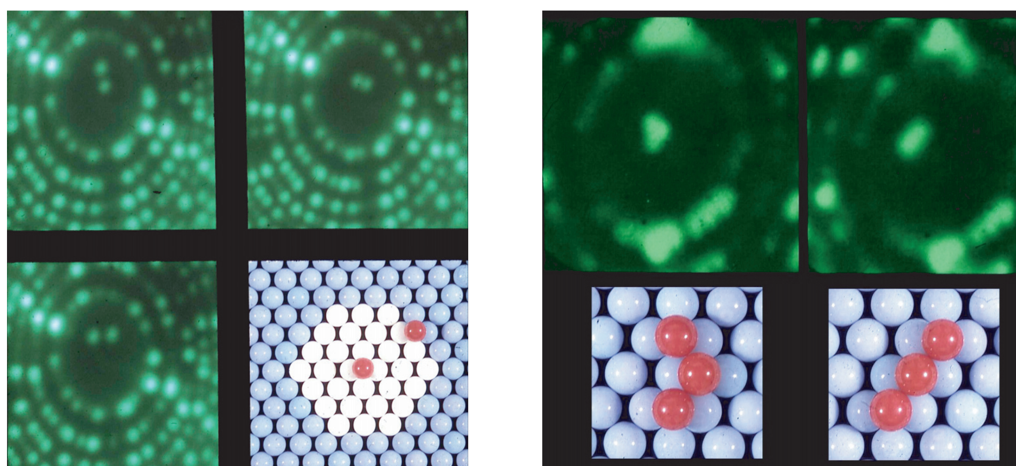
Nhóm	Khoáng chất	Tỷ lệ theo thể tích
Inosilicates	silicates *chuỗi đơn*: pyroxenes, như diopside	11(2) %
	silicates *chuỗi kép*: amphiboles/hornblende, như tremolite	5(1) %
Phyllosilicates	silicates *phiến*:	10 (2) %
	đất sét, như kaolinite, talc	5(1) %
	khoáng chất chứa nhiều mica, như biotite, muscovite	5(1) %
Tectosilicates	silicates *khối*:	65(5) %
	quartz, tridymite, cristobalite, coesite	11(1) %
	plagioclase feldspar, như albite	43(4) %
	alkali feldspars, như orthoclase	14(2) %
Silicates khác	với nhóm silica *cô lập*, *kép* hay *vòng* như olivine, beryl và garnets, hay silicates vô định hình, như opal	3(1) %
Đá Oxide	như magnetite, hematite, bauxite	5(1) %
Đá Carbonate	như calcite, dolomite	
Đá Sulfate	như gypsum, anhydrite	
Đá Halide	như thạch diêm hay halite, fluorite	
Các loại đá khác		
	phosphates, như apatite	1(0.5) %
	sulfides, như pyrite	
	kim loại tự nhiên, như vàng	
	borates,	
	và nhiều loại khác.	

công việc khá rắc rối.

Tiếp đến, một tinh thể gồm các hình cầu rắn, trong đó các hình cầu *không* chạm nhau, có thực là có *entropy lớn nhất* hay không? Vấn đề đơn giản này đã là đề tài nghiên cứu chỉ từ thập niên 1990 trở đi. Điều thú vị là, *khi nhiệt độ thấp*, sự sắp xếp đều đặn các hình cầu thực sự cho ta thấy entropy khả hữu lớn nhất. Ở nhiệt độ thấp, các hình cầu trong

BẢNG 6 Thành phần hoá học của đá tảng và đá cuội trong lớp vỏ Trái đất.

Nguyên tố	Tỷ lệ theo thể tích
Oxygen	46.7(1.0) %
Silic	27.6(0.6) %
Aluminium	8.1(0.1) %
Sắt	5(1) %
Calcium	4.3(0.7) %
Sodium	2.5(0.2) %
Potassium	2.0(0.5) %
Magnesium	2.5(0.4) %
Titanium	0.5(0.1) %
Các nguyên tố khác	0.8(0.8) %



HÌNH 27 Trên các đầu nhọn bằng tungsten, các nguyên tử rhenium, nhìn thấy ở giữa hình, không tạo thành các dimer (hình bên trái) mà tạo thành các trimer (hình bên phải) (© Hans-Werner Fink/APS, from Xem 53).

tinh thể có thể dao động quanh một vị trí cân bằng và như vậy mất trật tự hơn khi chúng ở trong chất lỏng; trong trạng thái lỏng các hình cầu sẽ cản trở chuyển động của nhau và không cho phép đạt tới giá trị entropy của chất rắn.

Nhiều kết quả tương tự đã được tìm thấy từ các nghiên cứu về *các lực entropy* này chứng tỏ rằng sự chuyển từ phase rắn sang phase lỏng – ít nhất là trong từng phần – chỉ đơn giản là một hiệu ứng hình học. Tương tự, người ta có thể kiếm được một kết quả đáng ngạc nhiên là ngay cả các hình cầu (hay nguyên tử) bị đẩy nhẹ cũng có thể tạo Xem 52 thành các tinh thể và nóng chảy ở nhiệt độ cao. Đây là những thí dụ đẹp đẽ về việc ta có thể giải thích các tính chất của vật chất theo tư duy cổ điển bằng cách chỉ sử dụng mô hình hạt vật chất của Thuyết lượng tử.

Nhưng xét về mặt năng lượng khi kết tinh ta lại gặp một số câu hỏi thú vị khác. Thuyết lượng tử chứng tỏ rằng *hai* nguyên tử đẩy nhau trong khi *ba* nguyên tử lại hút nhau. Hiệu ứng độc đáo này đã được Hans-Werner Fink khám phá và giải thích năm



HÌNH 28 Một số dạng của bông tuyết (© Furukawa Yoshinori).

Xem 53 1984. Ông nghiên cứu các nguyên tử rhenium trên mặt tungsten và chứng tỏ rằng, như ta đã thấy, chúng không thể tạo thành các dimer – hai nguyên tử cùng đi với nhau – mà lại tạo thành các trimer. Đây là một thí dụ mâu thuẫn với vật lý cổ điển; hiệu ứng này không thể xảy ra nếu ta hình dung các nguyên tử là các hình cầu không biến đổi được, nhưng lại có thể xảy ra khi ta nhớ lại rằng các đám mây electron bao quanh các nguyên tử có thể biến đổi tuỳ theo môi trường của chúng.

Để có thể nghiên cứu chính xác về năng lượng tinh thể, ta phải kể đến sự tương tác giữa các nguyên tử. Câu hỏi đơn giản nhất về năng lượng tinh thể là xác định năng lượng của một dãy đều đặn các hình cầu có điện tích trái dấu xen kẽ nhau có nhỏ hơn năng lượng của một tập hợp không đều đặn hay không. Đó vẫn còn là vấn để đang được nghiên cứu và ta chưa có câu trả lời.

Chủ đề trước liên quan tới khối tinh thể. Chủ đề kế tiếp là sự tạo thành mặt trong các tinh thể. Bạn có thể chứng minh rằng các mặt tinh thể là các mặt có tốc độ phát triển Câu đố 42 s *nhỏ nhất* vì tất cả các mặt phát triển nhanh nhất đều bị loại bỏ hết hay không? Quá trình Xem 54 này tự nó đã tạo thành một lĩnh vực nghiên cứu riêng.

Tuy vậy không phải các mặt phát triển chậm nhất luôn luôn là kẻ chiến thắng trong quá trình phát triển của tinh thể. Hình 28 cho ta thấy một số ngoại lệ nổi tiếng: bông tuyết. Ngày nay ta đã có thể giải thích được hình dạng của bông tuyết. Furukawa Yoshinori đứng đầu một nhóm nghiên cứu đặc biệt, là một trong những chuyên gia Xem 55 của lĩnh vực này. Việc giải thích cũng giải quyết luôn câu hỏi về sự đối xứng: tại sao tinh thể thường có tính đối xứng, thay vì không đối xứng? Đây là chủ đề về sự tự tổ chức đã Quyển I, trang 414 được đề cập trong phần Vật lý cổ điển. Hoá ra tính đối xứng là một kết quả tự động của phương thức phát triển của hệ phân tử dưới ảnh hưởng của sự khuếch tán kết hợp với các quá trình tăng trưởng phi tuyến. Nhưng như thường lệ đây cũng là một đề tài đang được nghiên cứu.

Một số tinh thể đáng chú ý

Tinh thể, giống như mọi cấu trúc trong thiên nhiên đều là kết quả của một sự tăng trưởng. Chúng là kết quả của sự chuyển động. Để tạo thành một tinh thể có tính đều đặn nhiều nhất và hình dạng của nó có tính đối xứng cao nhất, chuyển động phải là một sự phát triển *chậm rãi* của các mặt từ các thành phần cơ bản của chất lỏng (hay chất khí). Sự tăng trưởng cần có một áp suất, nhiệt độ và gradient nhiệt độ trong một khoảng thời gian nào đó. Đối với các tinh thể gây ấn tượng mạnh nhất là *đá quý*, các điều kiện thường ở cực hạn; đó là lý do tại sao chúng lại bền bỉ. Các điều kiện này thể hiện trong các loại đá đặc biệt ở sâu dưới lòng đất, nơi quá trình phát triển có thể diễn ra trong

Trang 69
hàng ngàn năm. Các tinh thể khoáng chất có thể hình thành trong 3 loại đá: đá hoả sinh (magma), đá biến chất và đá trầm tích. Các tinh thể khác có thể được tạo ra tại phòng thí nghiệm trong vài phút, vài giờ hay vài ngày và đã dẫn tới việc hình thành một ngành công nghiệp đặc biệt. Chỉ có một vài tinh thể lớn lên từ chất lỏng ở điều kiện tiêu chuẩn; thí dụ như thạch cao và nhiều loại sulfate, có thể kết tinh tại nhà; potassium bitartrate xuất hiện trong khi làm rượu, và những tinh thể lớn lên trong cây cỏ hay động vật như răng, xương hay các vi tinh thể nhạy từ.

Việc nuôi lớn, cắt, mài dũa các tinh thể là một ngành công nghiệp quan trọng. Đặc biệt nuôi tinh thể là một khoa học. Bạn có thể chứng minh bằng giấy và viết chì rằng chỉ có các mặt phát triển *chậm nhất* là có mặt trong các tinh thể hay không? Sau đây là một vài tinh thể quan trọng.



HÌNH 29 Thạch anh được tìm thấy ở St. Gotthard, Switzerland, có kích thước 12 cm (© Rob Lavinsky).



HÌNH 30 Citrine được tìm thấy ở Magaliesberg, Nam Phi, chiều cao tinh thể 9 cm (© Rob Lavinsky).



HÌNH 31 Amethystine và thạch anh màu cam được tìm thấy ở sông Orange, Namibia, có kích thước 6 cm (© Rob Lavinsky).

* *

Thạch anh, *thạch anh tím* (có màu bắt nguồn từ bức xạ và tạp chất sắt Fe^{4+}), *citrine* (có màu bắt nguồn từ tạp chất Fe^{3+}), *thạch anh màu khói* (có các tâm màu bị kích thích bởi các tia phóng xạ), *mã não* và *onyx* là tất cả các dạng tinh thể silicon dioxid hay SiO_2. Thạch anh được hình thành trong đá hoả sinh và đá magma; chúng cũng được tìm thấy trong nhiều loại đá trầm tích. Tinh thể thạch anh có khi lớn hơn con người. Phần lớn thạch anh tím phai màu theo thời gian nên đừng phí tiền mua sắm chúng.

Thạch anh là tinh thể thường gặp nhất trên Trái đất và người ta cũng đã thực hiện việc kết tinh nhân tạo để sử dụng trong các công việc đòi hỏi độ tinh khiết cao. Tinh thể có cấu trúc mặt thoi, hình dạng lý tưởng của nó là một lăng trụ 6 mặt, hai đầu là hai hình tháp 6 mặt. Thạch anh nóng chảy ở 1986 K, là chất áp điện và hoả điện. Tính áp điện giúp thạch anh trở nên hữu dụng trong các máy phát dao động điện và bộ lọc. Bạn có
Quyển I, trang 291
thể xem film về dao động của thạch anh trong đồng hồ ở quyển I. Thạch anh cũng được

sử dụng trong việc sản xuất kính, sợi quang, lớp phủ của polymer, quẹt gas, là nguồn cung cấp silic ...



HÌNH 32 Cương ngọc tìm thấy ở Laacher See, Germany, kích thước 4 mm (© Stephan Wolfsried).



HÌNH 33 Hồng ngọc tìm thấy ở Jagdalak, Afghanistan, chiều cao 2 cm (© Rob Lavinsky).



HÌNH 34 Lam ngọc tìm thấy ở Ratnapura, Sri Lanka, kích thước 1.6 cm (© Rob Lavinsky).

* *

Cương ngọc, *hồng ngọc* và *lam ngọc* là các dạng tinh thể của alumina, hay Al_2O_3. Cương ngọc là tinh thể alumina tinh khiết và không màu, hồng ngọc có pha tạp Cr và lam ngọc có pha tạp Ti hay Fe. Chúng có cấu trúc tinh thể tam giác và nóng chảy ở 2320 K. Ngọc thiên nhiên được tạo thành trong đá biến chất. Đã có lam ngọc vàng, lục, tím, hồng, nâu, xám và màu cam cá hồi, khi pha tạp với các chất khác. Màu của lam ngọc tự nhiên, giống như màu của nhiều loại đá quý khác, thường bị thay đổi khi ta thiêu kết hay xử lý nó bằng những cách khác.

Cương ngọc, hồng ngọc và lam ngọc được sử dụng làm nữ trang, chất tản nhiệt, giá thể tăng trưởng và trong laser. Cương ngọc có độ cứng chỉ thua kim cương nên được sử dụng làm 'kính' chống trầy cho đồng hồ và điện thoại. Hồng ngọc là đá quý đầu tiên được kết tinh nhân tạo năm 1892 bởi Auguste Verneuil (1856-1913), người đã phát tài nhờ công việc này. Các tinh thể cương ngọc nhân tạo hiện nay có thể cân nặng 30 kg hay hơn. Gốm alumina, có thể trắng hay trong suốt có vai trò quan trọng trong kỹ nghệ và y học.

* *

Tourmaline là khoáng vật thường gặp và có thể có màu đỏ, lục, lam, cam, vàng, hồng hay đen tuỳ theo thành phần của nó. Công thức hoá học của nó phức tạp dị thường và thay đổi tuỳ theo loại. Tourmaline có cấu trúc tam giác và thường tạo thành các tinh thể lăng trụ thiết diện tam giác. Nó chỉ được sử dụng làm nữ trang. Paraiba tourmaline, một loại



HÌNH 35 Hình bên trái: tinh thể thô của cương ngọc nhân tạo, kích thước khoảng 50 cm. Hình bên phải: một đơn tinh thể cương ngọc hiện đại 115 kg, kích thước khoảng 50 cm (© Morion Company, GT Advanced).

tourmaline rất hiếm màu lục hay lam, là một trong các loại đá quý đẹp nhất, nếu để tự nhiên và không mài dũa, có khi còn đắt hơn kim cương.



HÌNH 36 Tourmaline lưỡng sắc tự nhiên, tìm thấy ở Paprok, Afghanistan, kích thước 9 cm (© Rob Lavinsky).



HÌNH 37 Paraiba tourmaline đã được cắt gọt, xuất xứ từ Brazil, kích thước 3 cm (© Manfred Fuchs).

* *

Ngọc hồng lựu là một họ hợp chất thuộc loại $X_2Y_3(SiO_4)_3$. Chúng có cấu trúc tinh thể lập phương, có thể có nhiều màu tuỳ theo thành phần. Chúng không có tính cát khai và thường có dạng thập nhị diện thoi. Một số ngọc hiếm thay đổi màu sắc khi nhìn dưới ánh sáng ban ngày hay dưới ánh đèn nóng sáng. Ngọc hồng lựu thiên nhiên được tạo ra

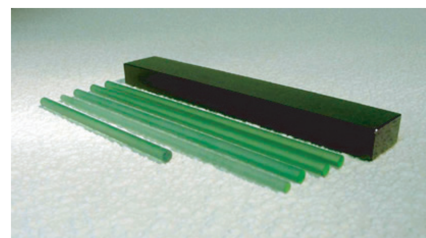
trong đá biến chất và được sử dụng làm nữ trang, đá mài và trong lọc nước. Ngọc hồng lựu nhân tạo được sử dụng trong các loại laser quan trọng.



HÌNH 38 Ngọc hồng lựu đỏ có thạch anh ám khói tìm thấy ở Lechang, China, kích thước 9 cm (© Rob Lavinsky).



HÌNH 39 Demantoid lục, một loại ngọc hồng lựu có màu thay đổi do có pha chromium, tìm thấy ở Tubussis, Namibia, kích thước 5 cm (© Rob Lavinsky).



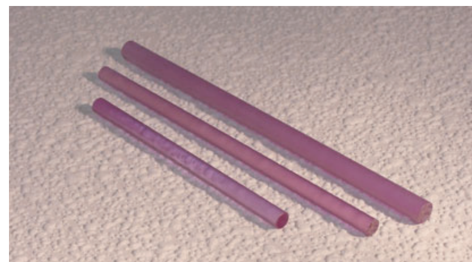
HÌNH 40 Cr,Tm,Ho:YAG nhân tạo, ngọc hồng lựu nhôm có pha yttrium, kích thước 25 cm (© Northrop Grumman).

* *

Alexandrite, một dạng *chrysoberyl* có tạp chất chromium, được sử dụng làm nữ trang và trong laser. Thành phần của nó là $BeAl_2O_4$; cấu trúc tinh thể là trực thoi. Chrysoberyl nóng chảy ở 2140 K. Alexandrite nổi tiếng do màu sắc có thể thay đổi: nó có màu lục dưới ánh sáng ban ngày hay ánh đèn huỳnh quang và màu tím thạch anh dưới ánh đèn nóng sáng, như đã thấy trong Hình 38. Hiệu ứng này bắt nguồn từ chất chromium: trường ligand nằm giữa trường của chromium trong hồng ngọc và trong ngọc lục bảo. Vài loại đá quý khác cũng có tính chất này đặc biệt là ngọc hồng lựu xanh và một số Paraiba tourmaline.



HÌNH 41 Alexandrite tìm thấy trong sông Setubal, Brazil, chiều cao tinh thể là 1.4 cm, dưới ánh sáng ban ngày (hình trái) và dưới ánh đèn nóng sáng (hình bên phải) (© Trinity Mineral).



HÌNH 42 Alexandrite nhân tạo, kích thước 20 cm (© Northrop Grumman).

* *

Perovskites là một loại tinh thể lập phương được dùng làm nữ trang và sử dụng trong laser điều hưởng. Cấu tạo tổng quát của chúng là XYO_3, XYF_3 hay $XYCl_3$.



HÌNH 43 Perovskite tìm thấy ở Hillesheim, Germany. Bề rộng 3 mm (© Stephan Wolfsried).



HÌNH 44 PZT nhân tạo hay chì zirconium titanate là một loại perovskite được sử dụng trong nhiều sản phẩm. Bề rộng 20 cm (© Ceramtec).

* *

Kim cương là một dạng nửa bền của *graphite*, tức carbon tinh khiết. Lý thuyết cho ta biết graphite là một dạng bền; thực tế cho ta thấy kim cương còn đắt hơn. Khác với graphite, kim cương có cấu trúc lập phương diện tâm, là chất bán dẫn có vùng cấm lớn và thường có hình bát diện. Kim cương cháy ở 1070 K; nếu không có oxygen nó biến thành graphite ở nhiệt độ khoảng 1950 K. Kim cương có thể được tạo thành trong đá hoả sinh và đá biến chất. Người ta có thể tổng hợp được kim cương có chất lượng vừa phải, tuy vậy người ta vẫn chưa tạo được kim cương kích thước lớn, có chất lượng cao. Kim cương có thể có màu và được pha thêm tạp chất để có tính dẫn điện. Kim cương chủ yếu được sử dụng làm nữ trang, trong việc đo độ cứng và trong đá mài.

* *

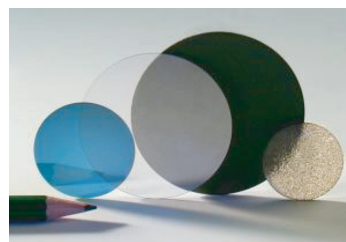
Silic, Si, không có dạng tinh khiết trong thiên nhiên; mọi tinh thể đều là nhân tạo. Có cấu trúc lập phương diện tâm giống kim cương. Nó khá giòn và có thể cắt thành các phiến mỏng và còn có thể làm mỏng hơn bằng cách mài hay khắc bằng phương pháp hoá học, để đạt tới bề dầy 10 µm. Là một chất bán dẫn, cấu trúc vùng năng lượng khiến cho nó có màu đen, vẻ sáng kim loại và tính giòn. Silic được sử dụng nhiều trong các chip silicon và trong chất bán dẫn điện tử. Ngày nay người ta có thể tạo ra các tinh thể silic lớn cỡ con người, không bị lệch mạng hay các 'sai hỏng đường' khác. (Chúng vẫn có thể chứa các 'sai hỏng điểm'.)

* *

Răng là các cấu trúc cho phép động vật sinh sôi nảy nở trên Trái đất. Chúng được tạo thành từ nhiều vật liệu; lớp bên ngoài, *men răng*, là 97 % hydroxylapatite, trộn với một tỷ lệ nhỏ của 2 nhóm protein, amelogenin và enamelin. Người ta vẫn chưa hiểu đầy đủ về sự tăng trưởng của răng, kể cả ở mức độ phân tử lẫn cơ chế tạo hình. Hydroxylapatite hoà tan trong acid; việc thêm các ion fluor biến hydroxylapatite thành fluorapatite và làm giảm mạnh tính hoà tan này. Đây là lý do của việc sử dụng fluor trong kem đánh



HÌNH 45 Kim cương thiên nhiên có xuất xứ từ Saha republic, Russia, kích thước 4 cm (© Rob Lavinsky).



HÌNH 46 Kim cương nhân tạo, kích thước 20 cm (© Diamond Materials GmbH).



HÌNH 47 Dao kim cương nhãn khoa, kích thước 1 cm (© Diamatrix Ltd.).

răng.

Hydroxylapatite (hay hydroxyapatite) công thức hoá học $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$, có cấu trúc tinh thể lục giác, cứng (hơn thép) nhưng tương đối giòn. Nó là khoáng chất có trong đá trầm tích (xem Hình 49), xương, sỏi thận, sỏi bàng quang, sỏi mật, xơ vữa động mạch, khớp bị viêm và răng. Hydroxylapatite là quặng phosphor được khai thác để dành cho công nghiệp hoá chất, được sử dụng trong Di truyền học để phân tách DNA dải đơn và dải đôi, để phủ các mảnh cấy ghép trong xương.

* *

Kim loại tinh khiết, như *vàng*, *bạc* và ngay cả *đồng*, được tìm thấy trong thiên nhiên, thường ở trong đá magma. Nhưng chỉ có vài hợp chất kim loại tạo thành tinh thể, như *pyrite*. Các đơn tinh thể kim loại tinh khiết đều là nhân tạo. Kim loại đơn tinh thể, thí dụ như sắt, nhôm, vàng hay đồng, rất mềm và dễ kéo thành sợi. Việc bẻ đi bẻ lại – còn gọi là gia công nguội – hay pha thêm tạp chất, tạo thành các hợp kim đều khiến cho chúng cứng và bền hơn. Thép không rỉ, hợp kim sắt giàu carbon là một thí dụ về việc sử dụng cả 3 quá trình trên.



HÌNH 48 Một máy nuôi tinh thể silicon và 2 tinh thể thành phẩm có chiều dài khoảng 2 m (© www.pvatepla.com).

* *

Xem 56
Năm 2009, Luca Bindi thuộc viện bảo tàng lịch sử thiên nhiên ở Florence, Ý, loan báo khắp thế giới về việc khám phá *chuẩn tinh thể* thiên nhiên đầu tiên. Chuẩn tinh thể là các chất có tính đối xứng phi tinh thể. Trước năm 2009, người ta chỉ biết các chất nhân tạo. Đến 2009, sau nhiều năm tìm kiếm, Bindi phát hiện một mẫu vật trong bộ sưu tập của ông có các hạt cho thấy có tính đối xứng bậc 5.

* *



HÌNH 49 Hydroxylapatite được tìm thấy ở Oxsoykollen, Snarum, Norway, dài 65 mm (© Aksel Österlöf).



HÌNH 50 Răng chính và răng dự trữ trên xương hàm cá mập, tất cả được hydroxylapatite bao phủ, kích thước 15 cm (© Peter Doe).



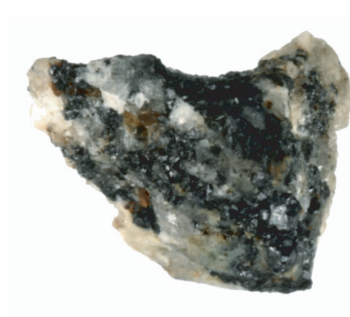
HÌNH 51 Pyrite, tìm thấy ở Navajún, Spain, bề rộng 5.7 cm (© Rob Lavinsky).

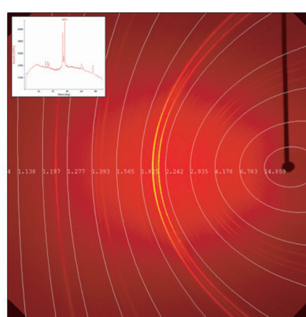


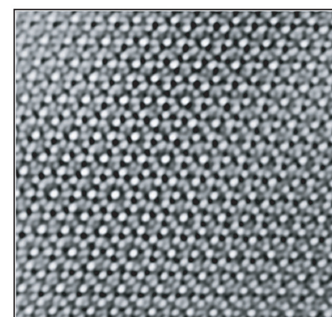
HÌNH 52 Bạc xuất xứ từ Colquechaca, Bolivia, bề rộng 2.5 cm (© Rob Lavinsky).



HÌNH 53 Đơn tinh thể đồng nhân tạo, bề rộng 30 cm (© Lachlan Cranswick).







HÌNH 54 Mẫu vật tìm thấy ở núi Koryak, Nga, là một phần của khoáng vật kỷ trias, có tuổi khoảng 220 triệu năm; chất màu đen là khatyrkite ($CuAl_2$) và cupalite ($CuAl_2$) nhưng cũng chứa các hạt chuẩn tinh thể công thức $Al_{63}Cu_{24}Fe_{13}$ có tính đối xứng bậc 5, hiển thị rõ ràng trong hình nhiễu xạ tia X và trong ảnh chụp bằng kính hiển vi điện tử truyền qua. (© Luca Bindi).

Người ta đã biết khoảng 4000 loại khoáng chất. Mặt khác, có khoảng 40 000 tên lỗi thời. Bạn có thể tìm được một danh sách chính thức trên internet, ở trang www.mindat.org hay www.minieralienatlas.de. Để tìm hiểu thế giới hình ảnh của tinh thể hãy xem trang www.smorf.nl. Mỗi năm có khoảng 40 khoáng chất mới được khám phá. Việc tìm kiếm và sưu tập khoáng chất là một môn tiêu khiển thú vị.

Làm thế nào để ta có thể nhìn xuyên qua vật chất?

Lượng tử tác dụng cho ta biết rằng mọi vật cản đều có rào thế hữu hạn. Lượng tử tác dụng hàm ý ta có thể xuyên qua vật chất. Điều này làm phát sinh một câu hỏi: Có thể nhìn xuyên qua một vật rắn không? Thí dụ như ta có thể thấy những gì ẩn giấu trong một ngọn núi không? Để làm được điều này ta cần một tín hiệu có 2 điều kiện: có thể *xuyên qua* núi và bị tán xạ *phụ thuộc vào vật liệu*. Thật sự có những tín hiệu như vậy và có nhiều kỹ thuật ứng dụng chúng. Bảng 7 cho ta một tổng quan về các khả năng như thế.

Quyển IV, trang 28

BẢNG 7 Các tín hiệu xuyên qua núi và các chất khác.

Tín hiệu	Độ đâm xuyên trong đá	Độ phân giải	Sự phụ thuộc vào vật liệu	Ứng dụng
Tín hiệu của lưu chất				
Sự khuếch tán của khí, như helium	*c.* 5 km	*c.* 100 m	trung bình	thám hiểm các hệ chân không và đường ống
Sự khuếch tán của nước hay hoá chất lỏng	*c.* 5 km	*c.* 100 m	trung bình	vẽ bản đồ các thuỷ hệ
Tín hiệu âm				
Hạ âm và động đất	100 000 km	100 km	nhiều	vẽ bản đồ lớp vỏ Trái đất và lớp mantle
Âm, sự nổ, sóng địa chấn ngắn	0.1 – 10 m	*c.* $\lambda/100$	nhiều	tìm kiếm dầu và quặng, vẽ bản đồ cấu trúc của các lớp đá, tìm kiếm kho tàng trong các tàu đắm bằng máy vẽ mặt đáy biển
Siêu âm		1 mm	nhiều	chụp ảnh y học, kính hiển vi âm học, sonar, hệ thăm dò bằng tiếng vọng
Chụp ảnh quang âm học		1 mm	trung bình	chụp ảnh dòng máu, chụp ảnh chuột
Tín hiệu điện từ				
Biến thiên của tĩnh từ trường			trung bình	tìm cáp, định vị lỗi cáp, tìm kiếm cấu trúc và kim loại trong đất đá và đáy biển
Dòng điện				nghiên cứu đất đá, tìm chỗ sâu răng
Thăm dò bằng sóng điện từ, 0.2 – 5 Hz				nghiên cứu đất đá nơi nước sâu và trên đất liền
Sóng vô tuyến	10 m	30 m tới 1 mm	ít	radar đất (tới 10 MW), chụp ảnh cộng hưởng từ, nghiên cứu trong lòng Mặt trời
Sóng vô tuyến băng thông cực rộng	10 cm	1 mm	vừa	tìm kiếm dây điện và ống trong tường, phát hiện ung thư vú

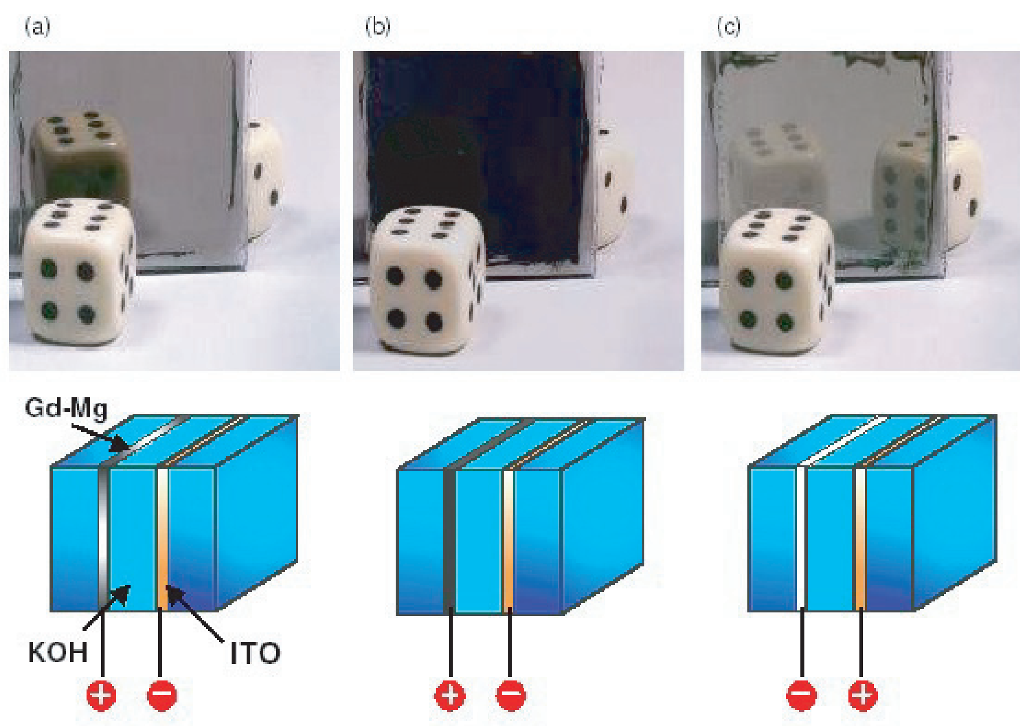
BẢNG 7 (Tiếp theo) Các tín hiệu xuyên qua núi và các chất khác.

Tín hiệu	Độ đâm xuyên trong đá	Độ phân giải	Sự phụ thuộc vào vật liệu	Ứng dụng
Sóng THz và mm	nhỏ hơn 1 mm	1 mm		nhìn xuyên qua quần áo, phong bì và răng Xem 57
Hồng ngoại	*c.* 1 m	0.1 m	trung bình	vẽ bản đồ đất trên 100 m
Ánh sáng khả kiến	*c.* 1 cm	0.1 μm	trung bình	chụp ảnh nhiều loại, khám nghiệm bướu trong vú
Tia X	vài mét	5 μm	nhiều	y học, phân tích vật liệu, kiểm tra ở phi trường, kiểm tra thực phẩm
Tia γ	vài mét	1 mm	nhiều	y học
Tín hiệu hạt vật chất				
Neutron từ lò phản ứng	lên tới *c.* 1 m	1 mm	trung bình	chụp ảnh cắt lớp các cấu trúc kim loại, thí dụ như tượng cổ hay máy xe hơi
Muon từ tia vũ trụ hay các nguồn kỹ thuật	lên tới *c.* 300 m	0.1 m	ít	tìm kiếm phòng ốc trong kim tự tháp, chụp ảnh trong xe vận tải
Positron	lên tới *c.* 1 m	2 mm	nhiều	chụp ảnh cắt lớp não
Electron	lên tới *c.* 1 μm	10 nm	ít	kính hiển vi điện tử truyền qua
Chùm Neutrino	năm ánh sáng	không	rất yếu	nghiên cứu Mặt trời
Tia phóng xạ	1 mm tới 1 m			kiểm tra an ninh ở phi trường
Lực hấp dẫn				
Biến thiên của g		50 m	thấp	tìm kiếm dầu, mỏ

Ta thấy nhiều tín hiệu có thể xuyên qua núi và các vật chất đậm đặc khác. Để phân biệt các vật liệu khác nhau hay phân biệt chất rắn với chất lỏng và không khí, âm và sóng vô tuyến là các lựa chọn tốt nhất. Thêm nữa, một phương pháp hữu dụng đều cần nhiều nguồn tín hiệu và bộ nhận tín hiệu tức là cần nhiều tiền. Có phương pháp đơn giản nào cho phép ta nhìn vào trong núi chính xác như tia X cho phép ta nhìn vào cơ thể người không? Thí dụ như có thể vẽ bản đồ phần bên trong của kim tự tháp không? Một chuyên gia về chuyển động sẽ cho một câu trả lời rõ ràng. Câu đố 43 s

Một trong những thành tựu của vật lý thế kỷ 20 là phát triển phương pháp tốt nhất để nhìn vào vật chất có kích thước khoảng 1m hay nhỏ hơn: chụp ảnh cộng hưởng từ. Ta sẽ bàn về nó sau. Trang 162

Các kỹ thuật chụp ảnh hiện đại khác nhau như chụp ảnh bằng tia X, chụp ảnh bằng siêu âm, trong tương lai sẽ rất hữu dụng trong y học. Như đã đề cập, không nên chụp ảnh phôi thai bằng siêu âm để chẩn đoán tiền sản. Các nghiên cứu đã cho ta thấy rằng Quyển I, trang 312 Quyển I, trang 312



HÌNH 55 Một gương Mg-Gd có khả năng đổi trạng thái (© Ronald Griessen).

siêu âm tạo ra âm nghe được có mức cường độ cao đối với thai nhi, đặc biệt khi nó được tắt mở lặp đi lặp lại và thai nhi sẽ có phản ứng tiêu cực với âm thanh ồn ào này.

Nhìn vào lòng đất lại quan trọng vì lý do khác. Nó giúp ta *định vị các mỏ trong đất*. Việc thăm dò các mỏ trong đất, đặc biệt mỏ không có kim loại, chôn sâu trong đất là một thách thức kỹ thuật rất lớn mà ta chưa giải quyết được. Nhiều công nghệ đã được thử nghiệm: thiết bị tán xạ ngược bằng tia X hoạt động ở mức từ 350 tới 450 keV, radar xuyên mặt đất, radar dải tần cực rộng, phát hiện bằng hồng ngoại, chiếu xạ và phân tích bằng neutron nhiệt hay neutron nhanh, phát hiện bằng âm và sonar, chụp ảnh cắt lớp điện trở, chiếu xạ bằng sóng có tần số vô tuyến, cộng hưởng tứ cực hạt nhân, sóng mm, phát hiện bằng hình ảnh, trắc phổ kế dựa trên tính linh động của ion, sử dụng chó, chuột, phát hiện hơi cháy nổ bằng các cảm biến đặc biệt. (Và dĩ nhiên, đối với các mỏ kim loại, người ta sử dụng từ kế và máy phát hiện kim loại.) Nhưng cho đến nay, chưa có giải pháp hữu hiệu. Bạn có cách nào khác không? Nếu có bạn hãy liên lạc với www.gichd.org.

Điều kiện cần để làm cho vật chất vô hình là gì?

Có thể bạn đã từng tưởng tượng ra những cuộc phiêu lưu trong lúc bạn *vô hình*. Năm 1996, một nhóm khoa học gia Hoà Lan đã tìm ra một chất, yttrium hydride hay YH_3, có thể chuyển từ trạng thái gương sang trong suốt và ngược lại bằng cách sử dụng một tín hiệu điện. Người ta cũng đã khám phá ra nhiều chất khác. Hiệu ứng của lớp Mg-Gd được trình bày trong Hình 55.

Xem 58

Gương đổi trạng thái có thể là bước đầu tiên để hiện thực hoá giấc mơ trở thành vô hình theo ý muốn. Năm 2006, và nhiều lần kể từ đó đến nay, các nhà nghiên cứu đã loan báo trên các phương tiện truyền thông về việc họ đã tạo được một *áo choàng vô hình*. Đây là một sự ba xạo trắng trợn. Sự dối trá này thường được dùng để xin tiền của những người nhẹ dạ, là những người thường mua các tiểu thuyết giả tưởng rẻ tiền hay quân đội. Thí dụ như người ta thường ba hoa rằng có thể làm vật thể vô hình bằng cách phủ siêu vật liệu lên nó. Tính không khả thi của điều này đã được chứng minh trước đây nên ta không bàn đến nó nữa.

Quyển III, trang 169
Thiên nhiên đã chỉ cho ta cách thức làm cho vật vô hình. Một vật vô hình nếu nó không có bề mặt, không hấp thu cái gì và kích thước nhỏ. Tóm lại, các vật vô hình là các đám mây nhỏ hay các phức hợp của chúng, thí dụ như các nguyên tử và phân tử. Các chất khí thuần nhất, không hấp thu cũng hội đủ các điều kiện này. Đó là lý do không khí (thường) vô hình. Khi không khí không thuần nhất, ta có thể thấy nó, thí dụ như trên các bề mặt có nhiệt độ cao.

Trái với chất khí, chất rắn và lỏng có bề mặt. Ta có thể thấy các mặt ngay cả khi các vật thể trong suốt vì chiết suất thay đổi tại các mặt đó. Thí dụ, có thể tạo ra thạch anh trong suốt sao cho ta có thể nhìn xuyên qua một lớp thạch anh dầy 1 000 km; thạch anh tinh khiết có thể trong suốt *hơn* cả không khí. Các vật làm bằng thạch anh như vậy vẫn có thể nhìn thấy được bằng mắt thường do chiết suất của chúng. Thạch anh chỉ vô hình khi được nhúng chìm trong chất lỏng có cùng chiết suất.

Tóm lại, một vật có hình dạng thì không thể vô hình. Nếu ta muốn trở thành vô hình thì phải biến đổi chính chúng ta thành một đám mây khí khuếch tán gồm các nguyên tử không hấp thu. Khi trở thành vô hình ta sẽ đánh mất mọi ký ức và gene, tức là, mọi cá tính vì một cá thể không thể được tạo ra bằng chất khí. Một cá thể được xác định bằng ranh giới của nó. Không có phương thức để ta vừa sống vừa vô hình; việc trở lại hữu hình cũng khó thực hiện được. Tóm lại, Thuyết lượng tử chứng tỏ rằng chỉ có người chết là có thể vô hình. Thuyết lượng tử đã đoan chắc một điều: không có ma; bây giờ ta thấy là nó cũng cấm luôn các vật vô hình.

Quyển IV, trang 137

CÁI GÌ CHUYỂN ĐỘNG BÊN TRONG VẬT CHẤT?

Mọi tính chất của vật chất đều bắt nguồn từ chuyển động của các thành phần của vật chất. Do đó, ta có thể khẳng định việc tìm hiểu chuyển động của electron và hạt nhân bao hàm việc tìm hiểu mọi tính chất của vật chất. Mặc dù vậy, đôi khi việc tìm hiểu chuyển động của một tập hợp electron hay hạt nhân có tính thực tế hơn. Đây là lý do ta chọn các chuyển động tập thể. Chuyển động tập thể là các chuyển động có hành trạng giống như các hạt đơn lẻ nên được gọi là *các chuẩn hạt*.

Trong chất rắn tinh thể, ta có thể mô tả sóng âm như các chuyển động của các *phonon*. Thí dụ như, phonon ngang và phonon dọc mô tả nhiều quá trình trong chất bán dẫn, trong laser thể rắn và trong các hệ siêu âm. Phonon hành xử gần giống với boson.

Trong kim loại, chuyển động của các sai hỏng trong tinh thể như *các lệch mạng* và *lệch hướng*, là trọng tâm của việc tìm hiểu sự cương hoá và sự đứt gãy của chúng.

Trang 298

Cũng trong kim loại, sóng điện tích của plasma electron dẫn, có thể được xem như được tạo thành từ các *plasmon*. Plasmon cũng có vai trò quan trọng trong Điện tử học tốc độ cao.

Trong từ chất, chuyển động định hướng của spin thường được mô tả tốt nhất nhờ

khái niệm magnon. Việc tìm hiểu chuyển động của magnon và của các vách domain từ rất có ích cho việc tìm hiểu từ tính của từ chất, thí dụ như trong nam châm vĩnh cửu, thiết bị lưu trữ từ tính hay động cơ điện. Magnon hành xử gần giống với boson.

Trong chất bán dẫn và chất cách điện, chuyển động của các *electron dẫn* và các *lỗ trống*, đóng vai trò quan trọng trong việc mô tả và thiết kế nhiều thiết bị điện tử. Chúng hành xử giống như các fermion có spin 1/2, có điện tích sơ cấp và có khối lượng phụ thuộc vào vật liệu, vào vùng dẫn riêng và vào hướng chuyển động riêng. Một hệ liên kết các electron dẫn và lỗ trống được gọi là một *exciton*. Nó có thể có spin bằng 0 hay 1.

Trong các vật liệu phân cực, chuyển động của ánh sáng xuyên qua vật có thể mô tả tốt nhất bằng các *polariton*, tức là chuyển động liên kết của các photon và lưỡng cực mang theo các kích thích của vật liệu. Polariton gần giống các boson.

Trong các tinh thể điện môi như các tinh thể ion vô cơ, chuyển động của một electron thường được mô tả tốt nhất bằng các *polaron*, là chuyển động liên kết của các electron cùng với các vùng phân cực liên kết bao quanh nó. Polaron là fermion.

Trong lưu chất, chuyển động của các xoáy là trọng tâm của việc tìm hiểu lốc xoáy và vòi rồng trong không khí. Đặc biệt trong siêu lưu chất, chuyển động xoáy được lượng tử hoá theo *roton* được dùng để xác định tính chất dòng chảy. Cũng trong lưu chất, chuyển động của bọt cũng rất có ích trong việc mô tả các quá trình hoà trộn.

Trong chất siêu dẫn, không chỉ chuyển động của các *cặp Cooper*, mà cả chuyển động của *ống từ thông* cũng được dùng để xác định các hành trạng nhiệt. Đặc biệt trong chất siêu dẫn mỏng và phẳng – các hệ '2 chiều' – các ống như vậy có tính chất hạt.

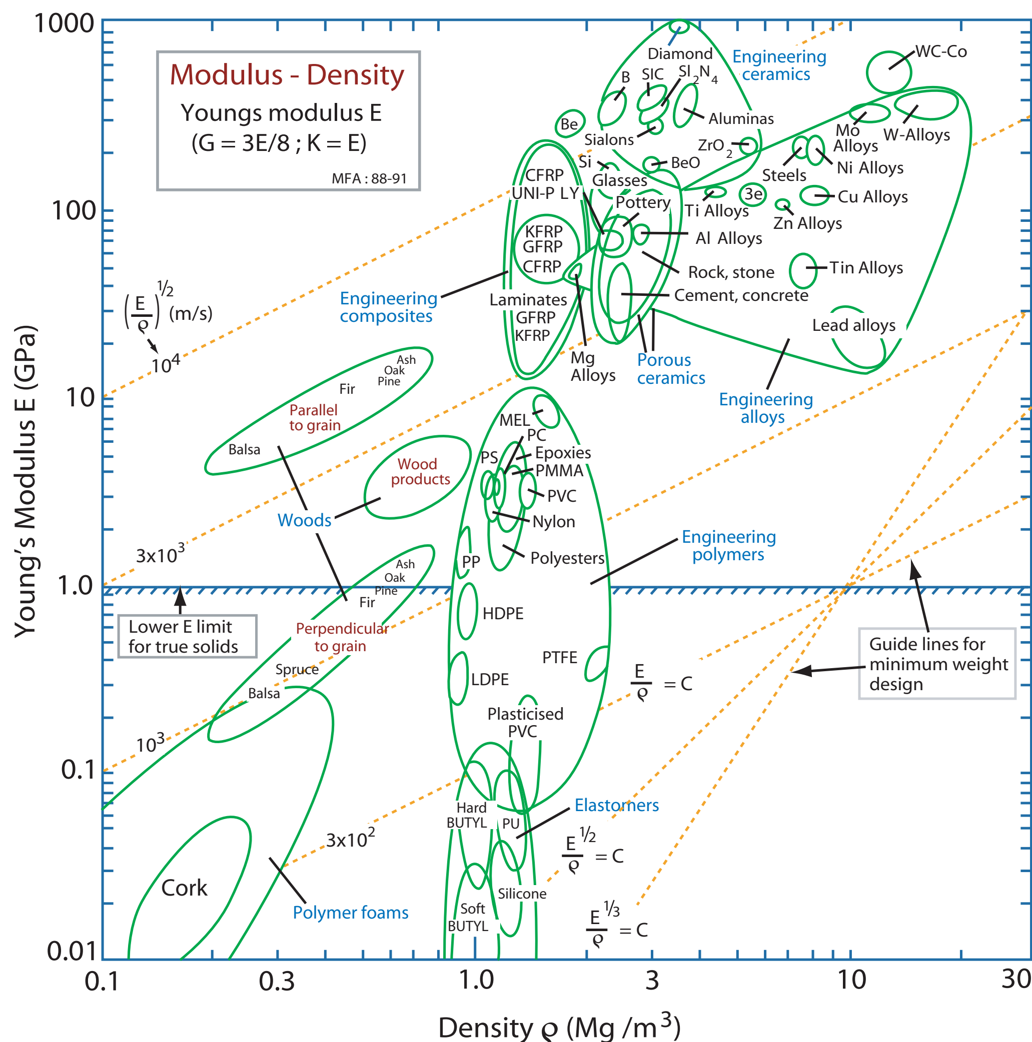
Trong tất cả các hệ vật chất ngưng tụ, chuyển động của các *trạng thái bề mặt* – như magnon mặt, phonon mặt, plasmon mặt, xoáy mặt – đều được xem xét.

Trong vật chất có nhiều *chuẩn hạt* khác, kỳ dị hơn. Mỗi chuẩn hạt đều là một lĩnh vực nghiên cứu quan trọng, trong đó Thuyết lượng tử đồng hành với Khoa học vật liệu. Để làm rõ các khái niệm này, ta cũng cần nói rằng *soliton*, nhìn tổng quát, không phải là một chuẩn hạt. 'Soliton' là một khái niệm toán học; nó áp dụng cho các sóng vĩ mô chỉ
Quyển I, trang 315
có một đỉnh sóng không thay đổi sau các va chạm. Nhiều vách domain có thể được xem như các soliton. Nhưng chuẩn hạt là các khái niệm mô tả các hiện tượng vật lý tương tự các hạt lượng tử.

Tóm lại, mọi thí dụ đã được đề cập về chuyển động tập thể trong vật chất, cả vĩ mô lẫn lượng tử, đều quan trọng trong Điện tử học, Quang tử học, kỹ nghệ và các ứng dụng y khoa. Nhiều đối tượng đã được lượng tử hoá và ta có thể nghiên cứu chuyển động của chúng giống như các hạt lượng tử thật.

Các câu đố vui và lạ về Khoa học vật liệu

Độ cao cực đại của một ngọn núi là bao nhiêu? Câu hỏi này dĩ nhiên là mối quan tâm của những người leo núi. Có nhiều hiệu ứng giới hạn chiều cao này. Yếu tố quan trọng
Xem 59
nhất là dưới áp suất lớn, chất rắn hoá lỏng. Trên Trái đất điều này xảy ra khi ngọn núi
Câu đố 44 ny
có chiều cao khoảng 27 km. Độ cao này cao hơn ngọn núi cao nhất một chút, đó là núi lửa Mauna Kea ở Hawaii, có đỉnh cao hơn nền đất khoảng 9.45 km. Trên Hoả tinh lực hấp dẫn yếu hơn nên núi sẽ cao hơn. Thật ra ngọn núi cao nhất trên Hoả tinh, Olympus mons, cao 80 km. Bạn có thể tìm ra một vài hiệu ứng giới hạn chiều cao khác hay không?
Câu đố 45 s



HÌNH 56 Một tổng quan về suất đàn hồi và mật độ vật chất. Đối với các cấu trúc cần nhẹ và cứng, thì tỷ số E / ρ^3 phải lớn; đồ thị cho ta thấy gỗ được tối ưu hoá cho mục đích này. (© Carol Livermore/Michael Ashby).

* *

Bạn có muốn trở nên giàu có hay không? Chỉ cần phát minh ra cái gì đó có thể sản xuất trong một nhà máy, rẻ tiền và có thể thay thế hoàn toàn cho lông vịt nhồi trong drap giường, túi ngủ hay lông của quả cầu trong môn vũ cầu. Một thách thức công nghiệp khác là tìm ra chất nhân tạo thay thế cho latex, và điều thứ 3 là tìm ra vật liệu thay thế cho bần/liège, đang mất đi nhanh chóng do sự ô nhiễm của môi trường.

Câu đố 46 r

* *

Các vật liệu khác nhau về mật độ, tính đàn hồi, độ bền, độ cứng, độ dai, nhiệt độ nóng

chảy, tính cách nhiệt, điện trở suất và nhiều tham số khác. Để có một tổng quan thì *biểu đồ Ashby* là hữu dụng nhất và Hình 56 là một thí dụ. Cuộc chạy đua tìm kiếm các vật liệu nhẹ hơn và cứng hơn gỗ đặc biệt là gỗ balsa, vẫn đang tiếp diễn.

* *

Câu đố 47 s Mỗi năm chiều cao của tháp Eiffel thay đổi bao nhiêu do sự co giãn vì nhiệt?

* *

Sự khác nhau giữa người làm ra con dao thời đại đồ đồng và người dựng nên tháp Eiffel là gì? Đó là việc kiểm soát sự phân bố của các sai hỏng. Các sai hỏng chính trong kim loại là các *lệch hướng* và *lệch mạng*. Lệch hướng là các sai hỏng trong tinh thể dưới dạng mặt; chúng là tính chất vi mô của đường biên dạng hạt. Lệch mạng là các sai hỏng trong tinh thể dưới dạng đường cong; điều quan trọng là sự phân bố và chuyển động của chúng trong kim loại sẽ xác định độ cứng. Để có thể hình dung về sự lệch mạng hãy xem tiếp dưới đây. Trang 299

* *

Câu đố 48 e Sự khác nhau giữa chất rắn, chất lỏng và chất khí là gì?

* *

Một chủ đề trong khoa học vật liệu là cách thức mà một vật rắn bị bẻ gãy. Có sự khác nhau giữa gãy *giòn* và gãy *dẻo*. Trong sự gãy giòn, thí dụ như một tấm kính, các cạnh sắc nhọn và không đều; trong sự gãy dẻo, thí dụ như thuỷ tinh nóng, các cạnh tròn và đều đặn. Hai kiểu gãy cũng khác nhau về cơ chế gãy tức là sự chuyển động của các sai hỏng và các nguyên tử liên quan. Sự khác nhau này khá quan trọng: khi một tai nạn xe ô tô xảy ra vào ban đêm, việc quan sát hình dạng của các mặt gãy của các dây tungsten trong đèn xe bằng kính hiển vi, ta sẽ dễ dàng kết luận được là đèn xe mở hay tắt lúc tai nạn xảy ra.

* *

Khoa học vật liệu cũng giúp ta phục hồi các thông tin bị xoá. Nhiều phòng thí nghiệm hiện nay đã có thể phục hồi dữ liệu trên đĩa cứng đã bị xoá. Các phòng thí nghiệm khác có thể phục hiện các số trên sườn xe đã bị xoá, ngay cả khi phần kim loại bị đốt nóng, bằng cách sử dụng Từ hiển vi học.

* *

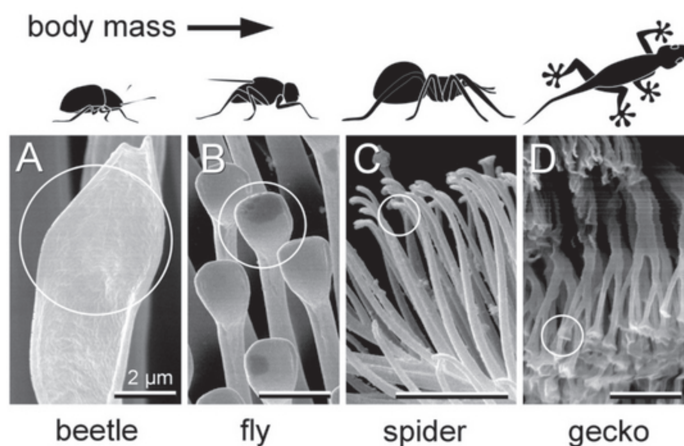
Thuyết lượng tử đã chứng tỏ rằng không có tường kín. Mọi vật liệu đều có thể bị xuyên
Câu đố 49 s qua. Tại sao?

* *

Thuyết lượng tử đã chứng tỏ rằng cho dù có các tường kín thì các nắp hộp làm bằng các bức tường như vậy cũng không bao giờ được đóng kín. Bạn có thể cung cấp các luận cứ
Câu đố 50 s cho vấn đề này hay không?

* *

Năm 1936, Henry Eyring đã cho rằng độ nhớt trượt của một chất lỏng η tuân theo hệ



HÌNH 57 Côn trùng và tắc kè/thằn lằn bám dính vào kính và các bề mặt khác bằng cách sử dụng lực van der Waals ở đầu của nhiều phiến mỏng trên bàn chân (© Max Planck Gesellschaft).

thức

$$\eta \geqslant \rho\hbar \,, \tag{9}$$

Câu đố 51 ny trong đó ρ là mật độ chất lỏng. Giới hạn dưới có đúng không?

* *

Nhiệt có thể chảy. Giống như tất cả các dòng chảy, Thuyết lượng tử tiên đoán rằng sự vận chuyển nhiệt bị lượng tử hoá. Điều này kéo theo việc độ dẫn nhiệt cũng bị lượng tử hoá. Và vào năm 2000, các thí nghiệm đã khẳng định điều này. Bạn có thể đoán ra đơn vị nhỏ nhất của độ dẫn nhiệt là bao nhiêu không? Xem 60 Câu đố 52 s

* *

Xem 61 Quyển I, trang 92 Robert Full đã chứng tỏ rằng lực van der Waals giúp cho thằn lằn đi trên tường và trần nhà. (Ta có thể thấy một bức ảnh trong Hình 56.) Tắc kè, một loại bò sát nhỏ có khối lượng khoảng 100 g, đã sử dụng một cấu trúc phức tạp trên bàn chân để thực hiện việc này. Mỗi chân của nó có 500 000 lông, mỗi lông tách ra thành 1000 phiến mỏng và mỗi phiến mỏng sử dụng lực van der Waals (hay nói khác đi, lực mao dẫn) để con vật bám dính vào bề mặt. Nhờ 500 triệu điểm dính này, tắc kè có thể bò trên các tấm kính thẳng đứng hay trần nhà; lực dính có thể lên tới 100 N mỗi chân. Lực dính lớn đến nỗi để gỡ chân ra cần một kỹ thuật đặc biệt. Trên internet có những video chiếu chậm cho ta thấy cách tắc kè biểu diễn ngón nghề này khi bước đi.

Chân có lông bám cũng được nhện nhảy (*Salticidae*) sử dụng. Nhện nhảy nâu (*Evarcha arcuata*) có chân phủ hàng trăm ngàn lông giúp cho nó bám vào các bề mặt nhờ lực van der Waals. Nhiều côn trùng cũng sử dụng các lông nhỏ cho mục đích này. Hình 57 cho ta một sự so sánh. Các nhà nghiên cứu đã chứng tỏ rằng con vật càng nặng thì các sợi lông càng mảnh. Eduard Arzt giải thích rằng các con ruồi và con bọ nhỏ thì các lông hình cầu đường kính vài micrometre trong khi con tắc kè lớn hơn và nặng hơn Xem 62 Xem 63

có các lông nano phân nhánh, đường kính 200 nm.

Các nhà nghiên cứu đã sao chép được các cơ cấu dính bằng lông, lần đầu tiên vào năm 2003, bằng cách sử dụng kỹ thuật in vi thạch bản trên polyimide, và người ta hy vọng là trong tương lai ta có thể tạo ra được các vật liệu dính chắc mà không cần phải dùng keo.

* *

Một trong những vật liệu kỳ diệu nhất trong thiên nhiên là xương. Xương nhẹ, cứng và có thể tự lành sau khi bị gãy. Nếu bạn quan tâm đến vật liệu phức hợp, hãy đọc thêm về xương: cấu trúc, như ta thấy trong Hình 58, cùng với các tính chất của chúng khá quyến rũ và phức tạp; cơ chế tăng trưởng và tự chữa lành của chúng cũng vậy. Tất cả hiện vẫn là các đề tài nghiên cứu.

Xem 64

* *

Thân cây ngũ cốc có tỷ lệ chiều cao/chiều rộng vào khoảng 300. Không có cột hay tháp nào do con người dựng lên có tỷ lệ như vậy. Tại sao?

Câu đố 53 s

* *

Sóng mm hay sóng terahertz được các vật ở nhiệt độ phòng phát ra. Hệ camera hiện đại cho phép ta tạo ra các tấm ảnh bằng sóng này. Bằng cách này ta có thể nhìn xuyên qua y phục, như đã thấy trong Hình 59. (Thận trọng là điều cần thiết; có nhiều người nghi ngờ tấm ảnh này được làm giả để nhận được nhiều ngân sách nghiên cứu.) Khả năng này có thể được sử dụng trong tương lai để phát hiện vũ khí được che giấu ở các phi trường. Nhưng việc phát triển một máy phát hiện thực tiễn, kinh tế, dễ sử dụng như một ống dòm vẫn đang tiếp diễn. Sóng này cũng có thể được sử dụng để nhìn xuyên qua giấy, làm cho ta có thể đọc thư mà không cần mở phong bì. Các dịch vụ thám tử đang lợi dụng kỹ thuật này. Ứng dụng thứ 3 của sóng này là chẩn đoán y khoa, thí dụ như phát hiện răng sâu. Sóng Terahertz hầu như không có phản ứng phụ và như vậy có lợi điểm hơn tia X. Điều trở ngại trong việc áp dụng chúng là thiếu các nguồn chất lượng cao mà giá rẻ.

* *

Có phải điểm nóng chảy của nước đá phụ thuộc vào từ trường không? Lời tuyên bố đáng kinh ngạc này của Inaba Hideaki và cộng sự đưa ra vào năm 2004. Họ tìm ra một độ sai lệch là 0.9 mK/T. Người ta cũng đã biết rằng từ trường cũng có ảnh hưởng tới chiết suất và phổ cận hồng ngoại của nước. Tóm lại, ta vẫn chưa biết rõ về nước.

Xem 65

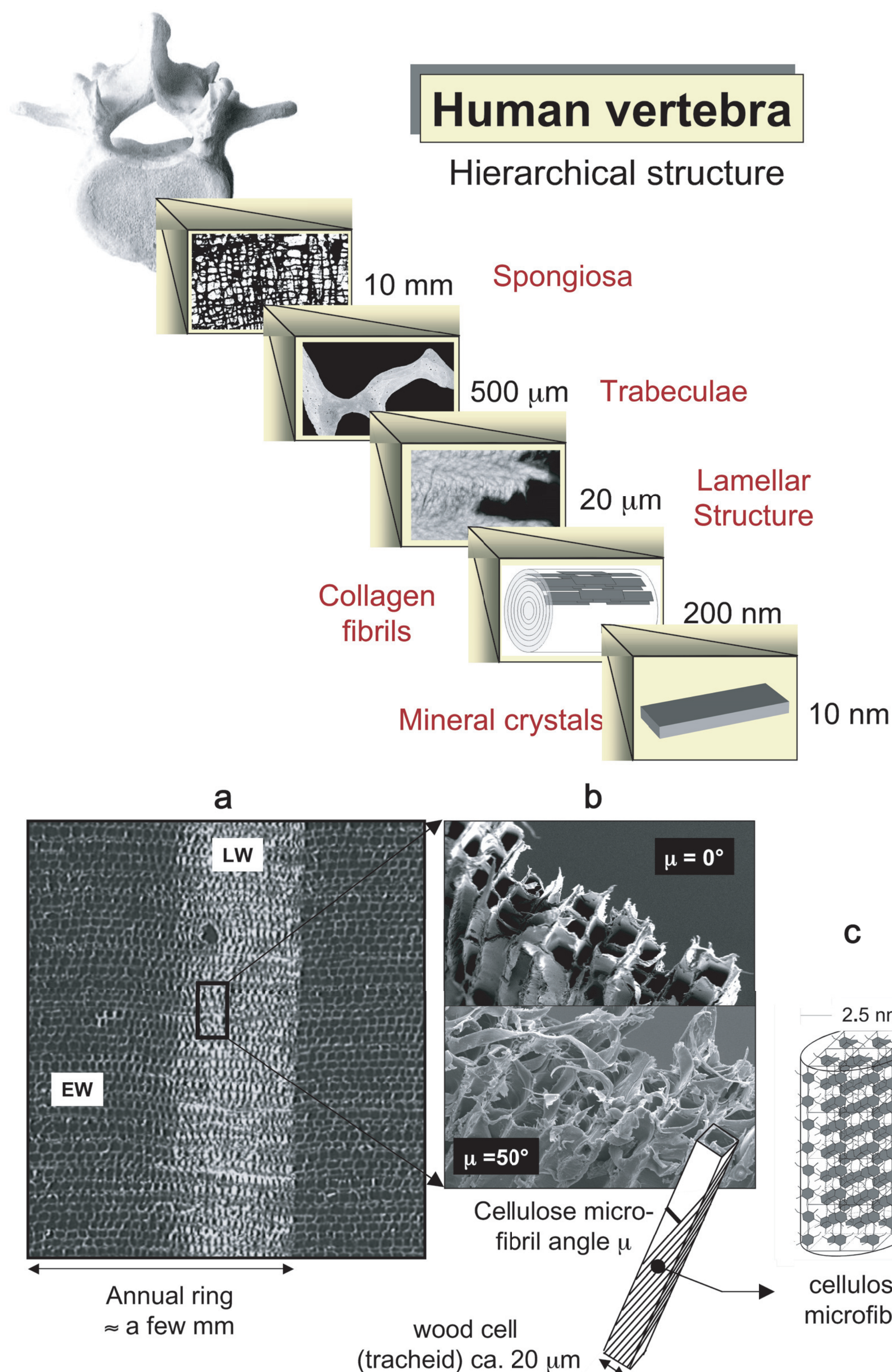
* *

Plasma hay khí bị ion hoá, có ích trong nhiều ứng dụng. Ta có thể thấy vài ứng dụng trong Hình 60. Plasma không chỉ được sử dụng trong việc nung, nấu - và được tạo ra bằng các phương tiện hoá học (plasma như vậy được gọi là lửa hay ngọn lửa) - mà chúng còn được tạo ra bằng điện và được sử dụng trong việc chiếu sáng hay kết lắng vật liệu. Plasma điện còn được nghiên cứu để khử trùng răng sâu.

* *

Người ta đã biết rằng nồng độ của CO_2 trong khí quyển từ năm 1800 đến 2005 đã tăng từ 280 tới 380 phần triệu như đã thấy trong Hình 61. (Năm 2016, giá trị này đã là 403

Xem 66



HÌNH 58 Cấu trúc xương của đốt sống của người (© Peter Fratzl và Physik Journal).



HÌNH 59 Một tấm ảnh được cho là chụp bằng sóng terahertz. Bạn có thể giải thích tại sao nó là một bức ảnh giả tạo hay không? (© Jefferson Lab)

Câu đố 54 s ppm. Bạn làm cách nào để đo được con số này?) Sự gia tăng này chắc chắn là do con người sử dụng các nhiên liệu hoá thạch chứ không phải do các nguồn tự nhiên như biển hay núi lửa. Có 3 điều cần bàn luận. Đầu tiên, có sự suy giảm của tỷ số $^{14}C/^{12}C$. Thứ 2, có sự suy giảm của tỷ số $^{13}C/^{12}C$. Sau cùng, có sự suy giảm của nồng độ oxygen. Cả 3 số đo này đều dẫn tới một điều là CO_2 gia tăng do việc đốt nhiên liệu làm cho ^{14}C và ^{13}C giảm đi đồng thời cũng làm giảm tỷ lệ oxygen. Các nguồn tự nhiên không gây ra 3 hiệu ứng này. Vì CO_2 là khí gây ra hiệu ứng nhà kính, các dữ liệu cho ta thấy con người chịu trách nhiệm chính trong việc làm cho nhiệt độ gia tăng theo các chu kỳ đều đặn. Trái đất nóng lên chính là do con người. Tính trung bình, Trái đất đã lạnh đi trong 10 triệu năm trước; tuy vậy, từ vài ngàn năm nay, nhiệt độ lại từ từ tăng lên; nhiệt độ tăng nhanh trong các thập niên gần đây làm cho nhiệt độ hiện nay giống như nhiệt độ của 3 triệu Xem 67 năm trước. Chiều hướng ấm lên của Trái đất trong từng thập niên, trong từng 1000 năm và chiều hướng lạnh đi trong từng triệu năm tương tác với nhau ra sao? Người ta đang nghiên cứu rất nhiều về chủ đề này.

* *

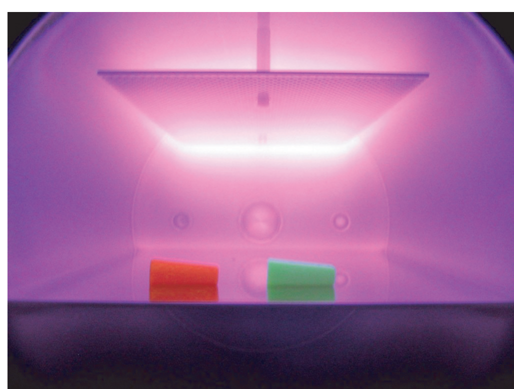
Việc làm ra các tinh thể có thể khiến cho người ta trở nên giàu có. Người đầu tiên làm được điều đó là một người Pháp, Auguste Verneuil (b. 1856 Dunkerque, d. 1913 Paris), bán hồng ngọc nuôi trong phòng thí nghiệm của ông trong nhiều năm mà không ai biết. Bây giờ nhiều công ty sản xuất ngọc nhân tạo bằng những máy còn nằm trong vòng bí mật. Một thí dụ được cho trong Hình 62.

Ngày nay kim cương nhân tạo đã thay thế kim cương tự nhiên trong hầu hết các ứng dụng. Trong những năm qua, người ta đã phát triển nhiều phương pháp sản xuất kim Xem 68 cương làm vật trang sức, màu trắng, lớn cỡ 10 carat hay to hơn. Những tiến bộ này sẽ tạo ra sự thay đổi lớn lao trong mọi lĩnh vực phụ thuộc vào loại đá này, như việc sản xuất các con dao phẫu thuật đặc biệt sử dụng trong việc thay thuỷ tinh thể của mắt.

* *

Công nghệ sản xuất các tinh thể *hoàn hảo*, không có các ranh giới hạt hay lệch mạng là







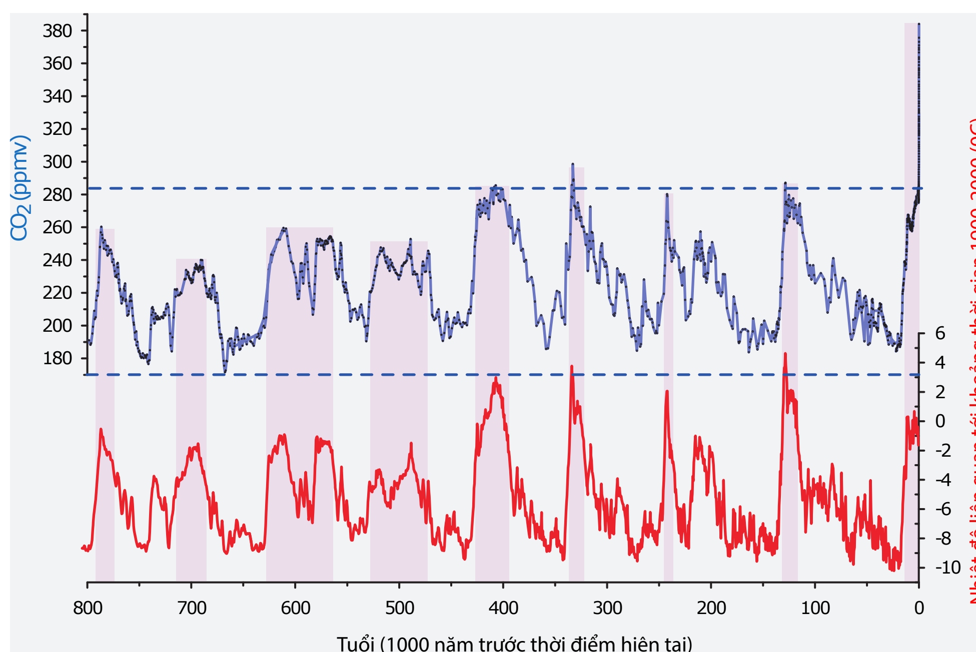
HÌNH 60 Một số máy plasma: một máy mạ các vật kim loại, một máy làm sạch các vật polymer và một thiết bị chữa trị các vết thương (© www.cemecon.de, www.diener.de, Max Planck Gesellschaft).

một phần quan trọng của nền công nghiệp hiện đại. Các tinh thể đều đặn hoàn chỉnh là nền tảng của các mạch tích hợp được sử dụng trong các thiết bị điện tử, trong bộ phận chủ yếu của laser và các hệ thống viễn thông đồng thời được sử dụng trong việc sản xuất đá quý tổng hợp.

* *

Câu đố 55 s Làm thế nào mà một cành cây nhỏ lại có thể xuyên thủng nhựa đường?

* *



HÌNH 61 Nồng độ CO_2 và sự thay đổi nhiệt độ trung bình của khí quyển trong 0.8 triệu năm qua (© Dieter Lüthi).

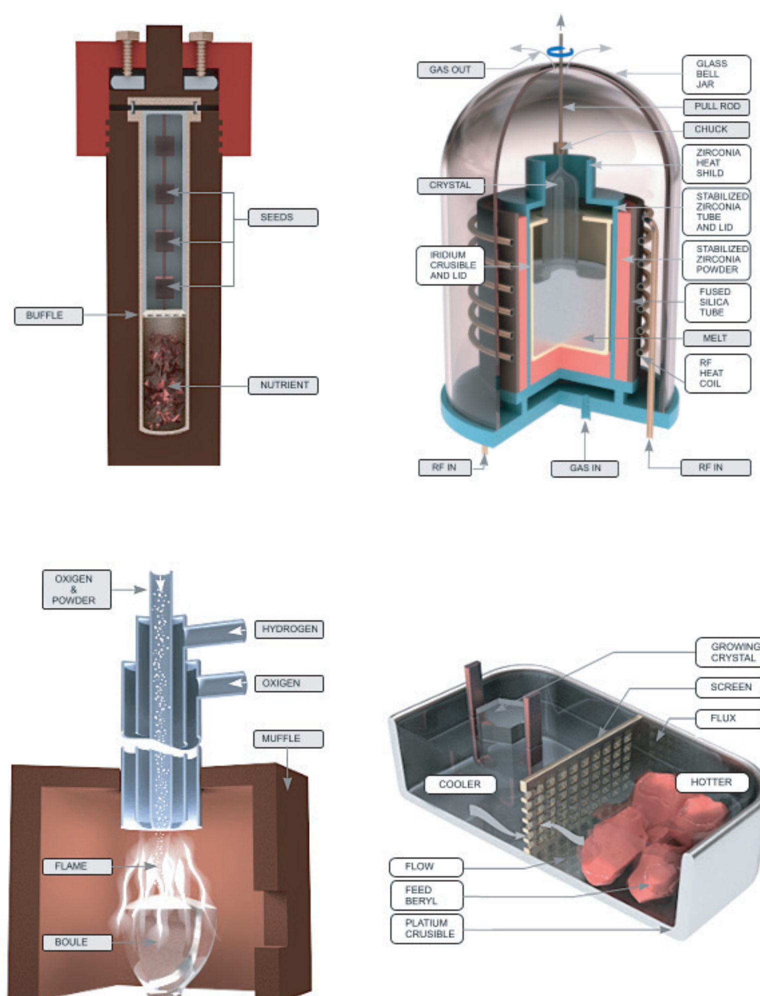
Nếu bạn thích các ảnh màu trừu tượng thì đừng quên quan sát các tinh thể lỏng bằng kính hiển vi. Bạn sẽ khám phá ra một thế giới diệu kỳ. Lời giới thiệu đầy đủ nhất là bài viết của Ingo Dierking. Xem 69

* *

Lực Lorentz dẫn tới một hiệu ứng thú vị trong vật liệu. Nếu một dòng điện chạy dọc theo một vật dẫn đặt trong một từ trường (không song song), một hiệu thế sẽ sinh ra giữa 2 cạnh của vật dẫn này vì các hạt mang điện bị đẩy lệch đi khi di chuyển. Hiệu ứng này được gọi là *hiệu ứng Hall* (cổ điển) theo tên vật lý gia Mỹ Edwin Hall (b. 1855 Great Falls, d. 1938 Cambridge), người phát hiện nó vào năm 1879, được trình bày trong luận án tiến sĩ của ông. Hiệu ứng được biểu diễn trong Hình 63, thường được ứng dụng trong *đầu dò Hall* để đo từ trường; hiệu ứng này cũng được sử dụng để đọc dữ liệu từ các thiết bị lưu trữ từ hay đo các dòng điện (cỡ 1 A hay hơn) trong một dây dẫn mà không cần phải cắt dây. Các thiết bị dò Hall điển hình có kích thước khoảng 1 cm xuống tới 1 μm và nhỏ hơn. Hiệu thế Hall V được cho bởi công thức

$$V = \frac{IB}{ned} , \tag{10}$$

trong đó n là mật độ electron, e là điện tích electron và d là bề dầy của đầu dò, như ta thấy trong Hình 63. Việc chứng minh công thức này là một bài tập trong trường trung học phổ thông. Hiệu ứng Hall là một hiệu ứng trong vật liệu và tham số n xác định hiệu thế Hall. Dấu của hiệu thế cũng cho ta biết hạt mang điện là dương hay âm; thật vậy, các Câu đố 56 e



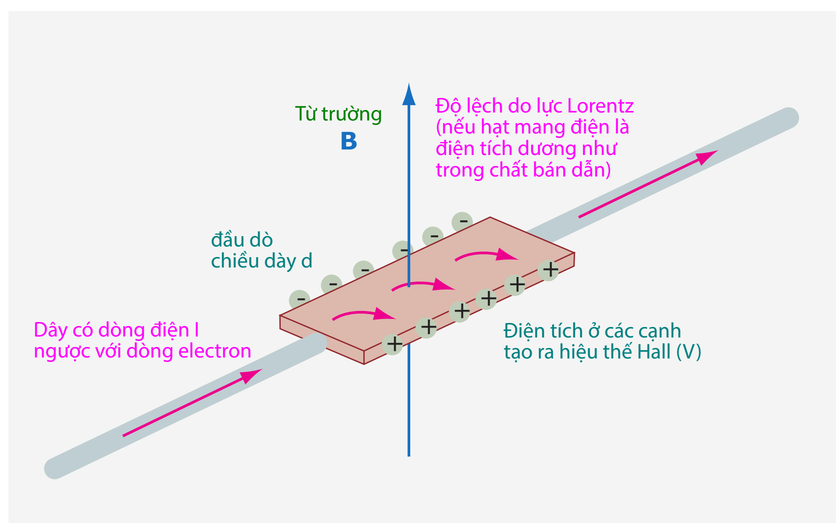
HÌNH 62 Bốn phương pháp nuôi các tinh thể đá quý nhân tạo. Hình trên: kỹ thuật thuỷ nhiệt, sử dụng để nuôi ngọc lục bảo, thạch anh, tinh thể đá và thạch anh tím, và kỹ thuật kéo Czochralski, được sử dụng để nuôi hồng ngọc, lam ngọc, spinel, ngọc hồng lựu nhôm-yttrium, ngọc hồng lựu gadolinium-gallium và alexandrite. Hình dưới: kỹ thuật nung chảy bằng lửa Verneuil, sử dụng để nuôi cương ngọc, lam ngọc, hồng ngọc và hạt spinel, và xử lý luồng chảy, sử dụng để tạo ra chrysoberyl (© Ivan Golota).

Câu đố 57 e phiến kim loại có dấu hiệu thế ngược với dấu trong hình vẽ.

Người ta đã nghiên cứu nhiều dạng của hiệu ứng Hall. Thí dụ như hiệu ứng Hall *lượng tử* và hiệu ứng Hall lượng tử phân số sẽ được tìm hiểu dưới đây. Trang 105

Năm 1998, Geert Rikken và cộng sự đã tìm thấy trong một số chất nào đó, photon cũng bị lệch đi trong từ trường; đây là *hiệu ứng Hall quang tử*. Xem 70

Năm 2005, Geert Rikken và cộng sự lại tìm thấy một chất, ngọc hồng lựu terbium gallium, khi có một dòng phonon chạy bên trong, được đặt trong từ trường sẽ tạo ra





HÌNH 63 Hình trên: hiệu ứng Hall (cổ điển). Hình dưới: một đầu dò Hall thu nhỏ hiện đại sử dụng hiệu ứng này để đo từ trường (© Metrolab).

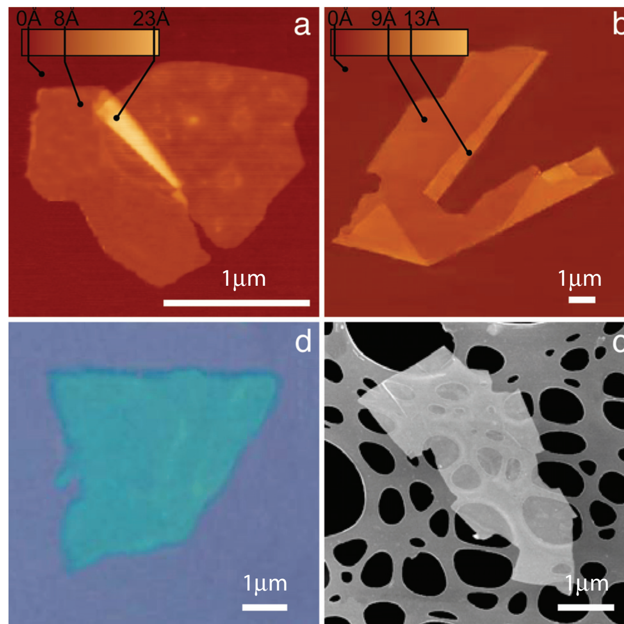
Xem 71 một nhiệt hiệu giữa 2 mặt. Họ gọi hiệu ứng này là *hiệu ứng Hall phonon*.

* *

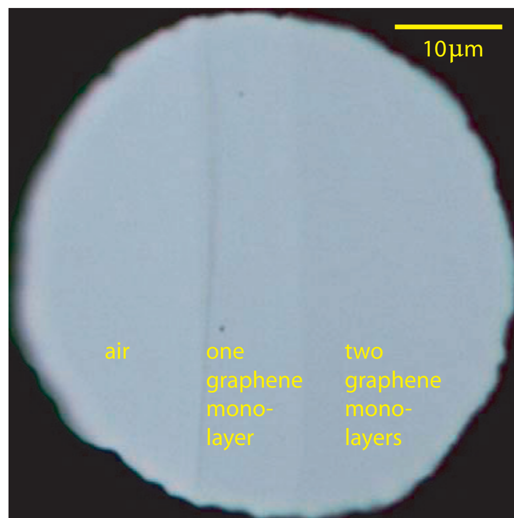
Từ trường có ảnh hưởng đến sự kết tinh của calcium carbonate trong nước không? Đây là một chủ đề đang gây ra rất nhiều tranh cãi. Từ trường có thể/không thể làm thay đổi các mầm tinh thể từ calcite thành aragonite, dẫn tới việc các thành bên trong của các ống nước có thể bị carbonate bao phủ hoặc không. Hệ quả về mặt công nghiệp thu gọn *kích cỡ* sẽ rất lớn. Vấn đề này vẫn đang chờ các dữ liệu chứng minh. Xem 72

* *

Xem 73 Hiện nay người ta đã tạo ra được các lớp graphite và các chất khác (như BN, MoS_2, $NbSe_2$, $Bi_2Sr_2CaCu_2O_x$) mỏng nhất: các lớp tinh thể này có bề dày đúng 1 nguyên tử! Việc tạo ra *graphene* – tên của lớp graphite đơn nguyên tử – cực kỳ phức tạp: bạn cần graphite từ viết chì và một cuộn băng keo.Đó có thể là lý do tại sao ta phải chờ đến năm 2004 để phát triển kỹ thuật này. (Đúng ra tính bền bỉ của các lớp đơn nguyên tử vẫn gây thắc mắc trong nhiều năm trước đó. Nhiều vấn đề trong Vật lý không thể quyết định bằng giấy và viết chì; đôi khi bạn phải cần đến băng keo.) Graphene và các *tinh thể 2 chiều* khác (dĩ nhiên đây là sự thổi phồng kiểu báo lá cải) được nghiên cứu để tìm hiểu



HÌNH 64 Các lớp đơn nguyên tử do kính hiển vi lực nguyên tử vẽ ra, a: $NbSe_2$, b: graphite hay graphene, d: ảnh của lớp đơn nguyên tử MoS_2 chụp bằng kính hiển vi quang học, và c: ảnh của lớp đơn nguyên tử $Bi_2Sr_2CaCu_2O_x$ trên một tấm carbon có lỗ thủng chụp bằng kính hiển vi điện tử quét (từ Xem 73, © 2005 National Academy of Sciences).



HÌNH 65 Một ảnh chụp bằng kính hiển vi cho thấy độ hấp thu của một lớp graphene đơn và kép – nó cũng cho ta một cách để nhìn thấy hằng số cấu trúc tinh tế. (© Andre Geim).

các tính chất điện cơ của chúng; trong tương lai người ta có thể ứng dụng chúng trong các pin có hiệu suất cao.

* *

Lớp graphene đơn có một tính chất quang học kỳ lạ. Độ hấp thu ánh sáng của nó trên toàn bộ quang phổ là $\pi\alpha$, với α là hằng số cấu trúc tinh tế. (Biểu thức chính xác của độ hấp thu là $A = 1 - (1 + \pi\alpha/2)^{-2}$.) Biểu thức này là hệ quả của điện dẫn suất $G = e^2/4\hbar$ đối với mọi lớp graphene đơn. Giá trị của độ hấp thu khoảng 2.3 %. Giá trị này có thể



HÌNH 66 Vẻ đẹp của Khoa học vật liệu: mặt lá sen làm cho các giọt nước có dạng hình cầu; PTFE (teflon) kết tụ bằng plasma trên vải cũng cho ta một hiệu ứng tương tự đối với các giọt nước màu trên nó (© tapperboy, Diener Electronics).

thấy được bằng mắt thường, như trong Hình 65. Như vậy graphene cho ta một cách để Xem 74 'nhìn thấy' hằng số cấu trúc tinh tế .

* *

Vàng hấp thu ánh sáng. Do đó nó được sử dụng trong các quyển sách đắt tiền để viền các cạnh trang sách. Không kể việc bảo vệ cho sách khỏi bụi, nó còn làm cho các cạnh của trang sách không biến thành màu vàng khi có ánh mặt trời chiếu vào.

* *

Giống như cây cối, tinh thể cũng có các *vòng tăng trưởng*. Thạch anh màu khói nổi tiếng về những *bóng ma* này, giống như fluorite và calcite.

* *

Khoa học và nghệ thuật xử lý bề mặt vẫn còn nhiều thay đổi như Hình 66 cho ta thấy. Việc tạo ra các bề mặt không dính ướt, một phần quan trọng trong Khoa học vật liệu hiện đại, là sao chép lại những gì mà lá sen *Nelumbo nucifera* đã làm trong thiên nhiên. Quyển I, trang 41 Mặt không dính ướt cho phép các giọt nước nảy lên giống như quả bóng bàn. Mặt lá sen sử dụng tính chất này để tự làm sạch do đó hiệu ứng có tên là *hiệu ứng lá sen*. Đây cũng là lý do hoa sen trở thành biểu tượng của sự thuần khiết.

* *

Đôi khi sự nghiên cứu tạo ra các vật liệu kỳ quái. Thí dụ như *aerogel*, chất rắn rất xốp, mà ta thấy trong Hình 67. Aerogel có mật độ vài g/l, nhỏ hơn nước vài trăm lần và chỉ hơn không khí vài lần. Giống như các vật liệu xốp khác, aerogel là chất cách điện tốt; tuy vậy, chúng dễ bị phá huỷ nên chưa được sử dụng nhiều.

* *

Xuất xứ của các khoáng chất trong rừng nhiệt đới Amazon là đâu? Sông Amazon cuốn sạch nhiều khoáng chất màu mỡ vào Đại tây dương. Làm cách nào để rừng nhiệt đới lấy lại các khoáng chất đó? Vấn đề trở nên sáng tỏ sau nhiều nghiên cứu miệt mài: nguồn khoáng chất lớn nhất do không khí mang lại từ sa mạc Sahara. Gió thổi bụi từ sa mạc



HÌNH 67 Một miếng aerogel, chất rắn xốp đến nỗi nó có tính trong mờ (courtesy NASA).

Sahara tới lưu vực sông Amazon, ngang qua Đại tây dương. Người ta đã ước lượng có khoảng 40 triệu tấn bụi di chuyển từ Sahara tới rừng nhiệt đới Amazon mỗi năm.

* *

Nhiều vật liệu trải qua các biến đổi khó tin. Trạng thái sau cùng của *rêu* là gì? Những lượng rêu lớn thường trở thành than bùn. Than lâu đời trở thành lignite hay than nâu. Lignite lâu dần trở thành than đen (than có nhựa đường). Than đen có thể trở thành *kim cương*. Tóm lại, kim cương có thể là trạng thái sau cùng của rêu.

* *

Trong Khoa học vật liệu có một giấc mơ: tạo ra một chất cứng hơn kim cương. Không rõ giấc mơ này có thành hiện thực hay không. Tương lai sẽ cho ta biết.

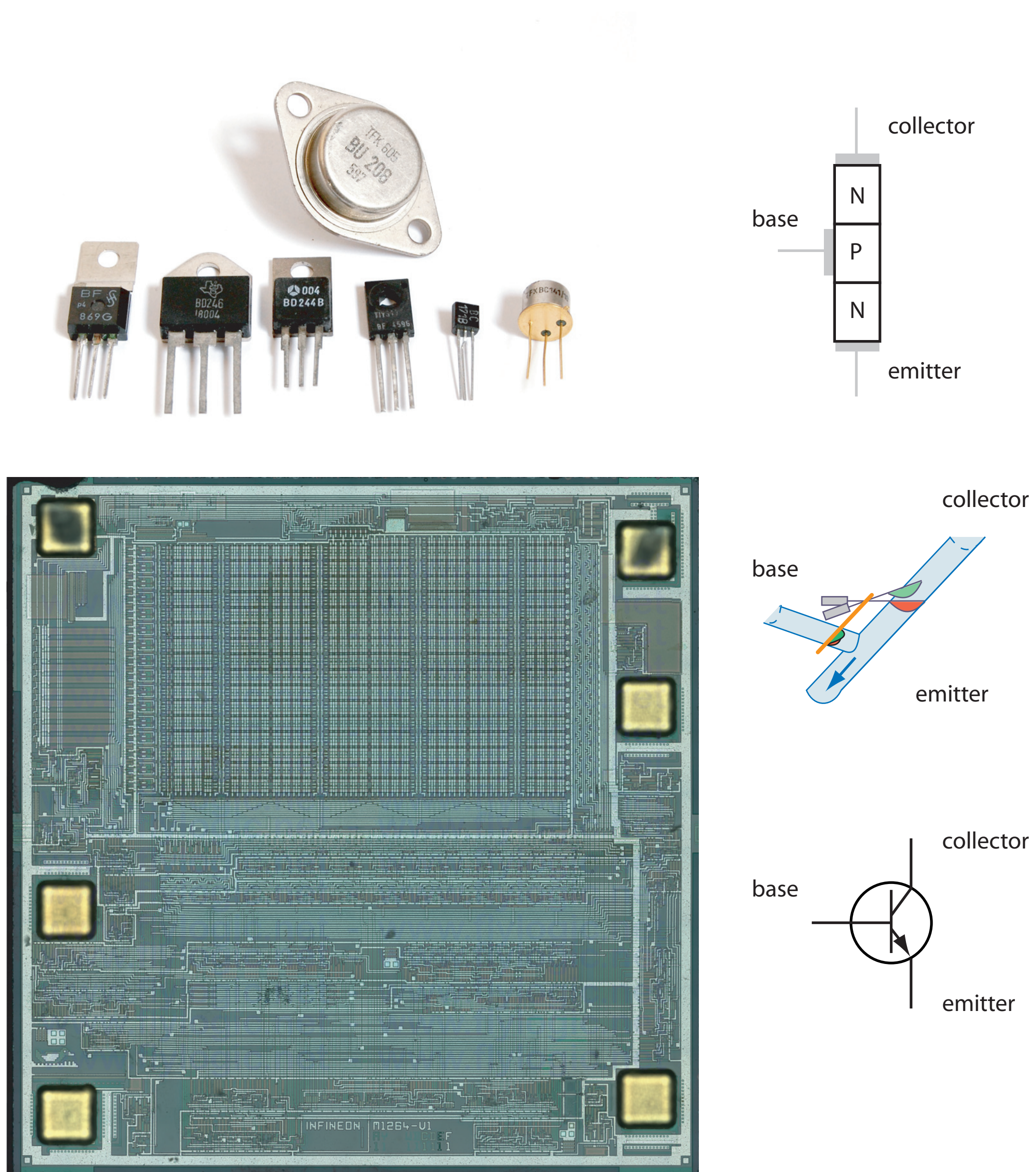
Công nghệ lượng tử

> “Thà bị chết dần mòn hơn là bị cuốn trôi
> đi cùng với chuyển động vĩnh cửu.”
> William Shakespeare *King Henry IV*.

Các hiệu ứng lượng tử không chỉ xuất hiện trong các hệ vi mô hay trong các tính chất của vật liệu. Nó còn được *ứng dụng* trong cuộc sống hiện đại: các công nghệ như transistor, laser, siêu dẫn và các hiệu ứng cùng các hệ thống khác đã ảnh hưởng sâu đậm đến nền văn minh của chúng ta.

Transistor

Transistor có mặt trong hầu hết các thiết bị y tế cũng như trong các thiết bị viễn thông. Một *transistor*, như trong Hình 68 là thiết bị cho phép ta kiểm soát một dòng điện lớn bằng một dòng điện nhỏ; do đó nó có thể đóng vai trò của một công tắc điều khiển bằng điện hay vai trò của một bộ khuếch đại. Transistor được làm bằng silic và có thể nhỏ cỡ 2 x 2 μm và lớn cỡ 10 x 10 cm. Transistor được sử dụng để điều khiển các tín hiệu trong máy trợ tim và dòng điện trong động cơ của tàu điện. Transistor khuếch đại là bộ phận chính của máy phát trong mobile phone và transistor chuyển mạch là bộ phận chính trong máy tính và màn hình.



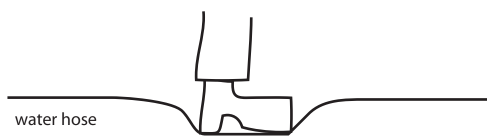
HÌNH 68 Hình trên: các thí dụ về các transistor được đóng gói. Hình bên phải: cấu trúc bán dẫn cơ bản, cấu trúc dạng nước tương đương và sơ đồ kỹ thuật của một transistor NPN. Hình dưới: một mạch tích hợp điển hình của các thẻ thông minh bao gồm một số lớn transistor. (© Benedikt Seidl, blog.ioactive.com)

Hầu hết các transistor đều làm bằng *chất bán dẫn*, tức là chất mà các electron dẫn *gần như* tự do. Các thiết bị được tạo ra theo một phương thức sao cho việc tác dụng một tín hiệu điện sẽ làm thay đổi độ dẫn điện. Sự hoạt động của transistor đều dựa trên hiệu thế và hiệu ứng xuyên hầm; transistor là các thiết bị lượng tử ứng dụng.

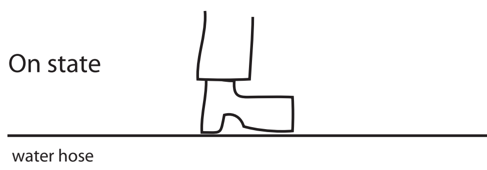
Transistor chỉ là một trong một họ các thiết bị bán dẫn bao gồm transistor hiệu ứng trường (FET), transistor hiệu ứng trường silic oxid kim loại (MOSFET), transistor

MOSFET

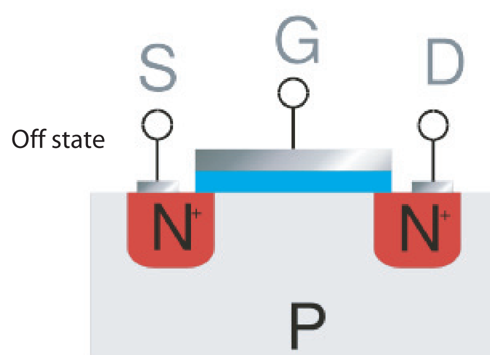
Off state



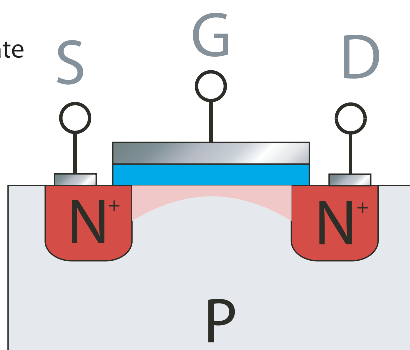
On state



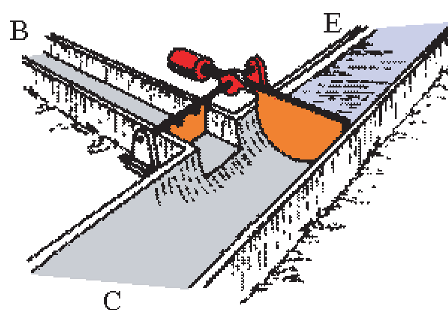
Off state

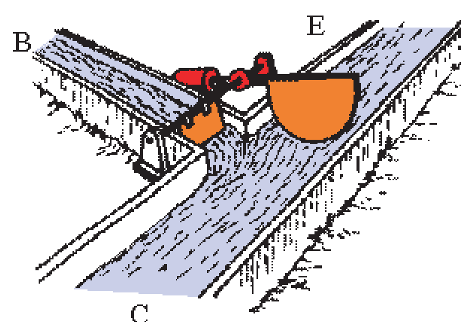


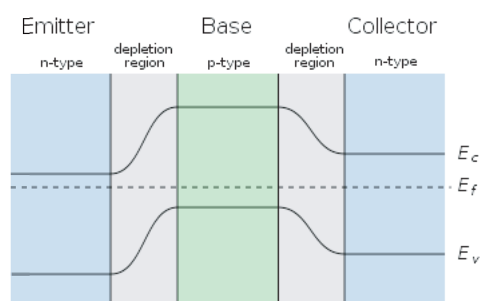
On state

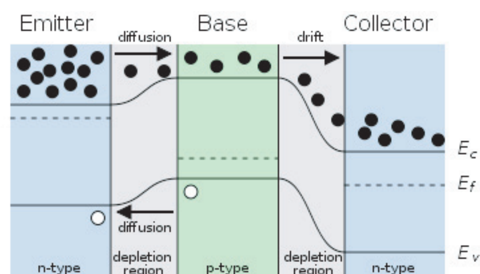


Bipolar transistor









HÌNH 69 Cấu tạo và sự hoạt động của một transistor hiệu ứng trường silic oxid kim loại (hình bên trái) và transistor lưỡng cực (hình bên phải). Hình biểu diễn các trạng thái 'tắt' và 'mở' (© Leifi Physik, Wikimedia).

hiệu ứng trường cổng tiếp giáp (JFET), transistor lưỡng cực cổng cách điện (IGBT) và transistor đơn tiếp giáp (UJT), ngoài ra còn có memristor, diode, PIN diode, diode Zener,

diode thác, diode phát quang (LED), quang diode, tế bào quang điện, diac, triac, thyristor và sau cùng, mạch tích hợp (IC). Các thiết bị này rất quan trọng trong các ứng dụng công nghiệp: công nghiệp bán dẫn có doanh số ít nhất là 300 tỷ Euro mỗi năm (số liệu năm 2010) và sử dụng hàng triệu công nhân trên khắp thế giới.

Chuyển động không ma sát – siêu dẫn và siêu lưu

Chúng ta thường nghĩ rằng không thể tránh khỏi ma sát. Thậm chí ta cũng đã biết ma sát là kết quả của cấu trúc hạt của vật chất. Nhưng có một điều làm cho các nhà vật lý kinh ngạc là chuyển động *không* ma sát lại có thể xảy ra.

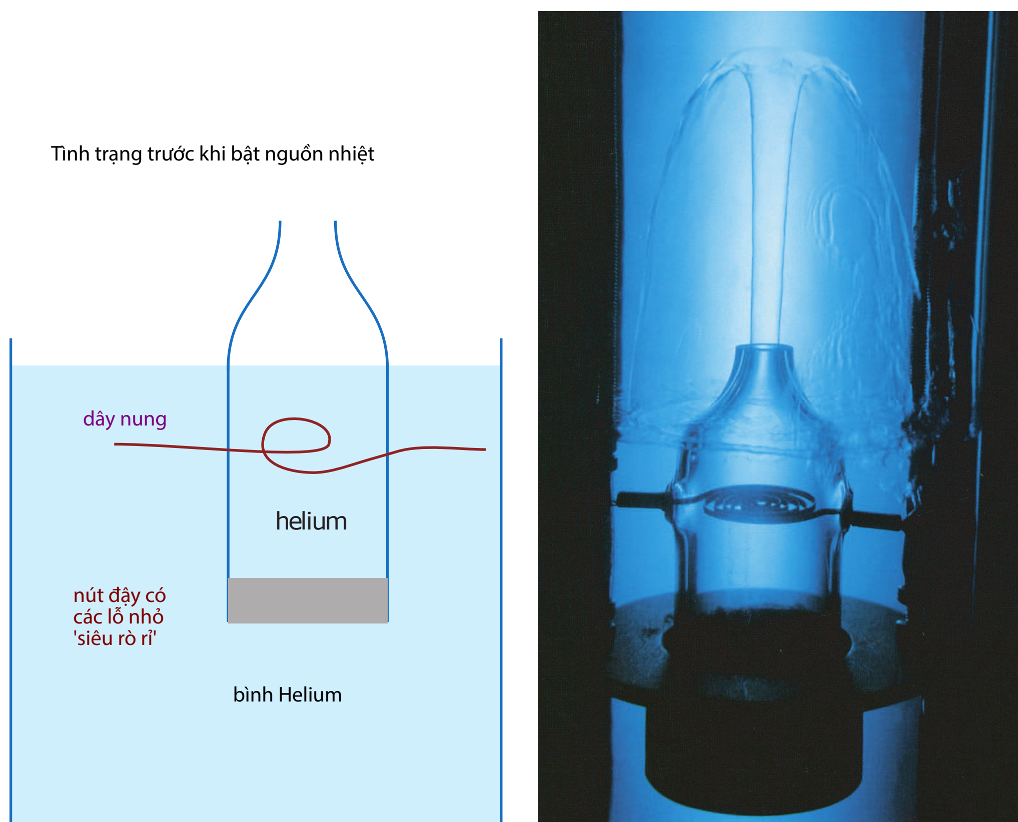
Năm 1911 Gilles Holst và Heike Kamerlingh Onnes đã phát hiện ra khi nhiệt độ thấp, dòng điện có thể chạy xuyên qua chì mà không bị cản trở tức là không có ma sát. Hiện tượng này được gọi là *sự siêu dẫn*. Trong một thế kỷ sau đó, người ta tìm thấy nhiều kim loại, hợp kim và gốm cũng có tính chất như vậy.

Điều kiện để quan sát được chuyển động không ma sát là các hiệu ứng lượng tử sẽ đóng một vai trò chính yếu. Để bảo đảm cho điều này, ta cần nhiệt độ thấp. Dù lượng dữ liệu rất lớn, người ta chỉ mất trên 40 năm để hiểu rõ hiện tượng siêu dẫn. Việc này xảy
Xem 75 ra năm 1957, khi Bardeen, Cooper và Schrieffer công bố công trình của họ. Ở nhiệt độ thấp, electron vận hành trong vật chất chủ yếu là do lực *hút* khiến chúng tạo thành các cặp có tên là *cặp Cooper*. Chúng là các boson hiệu dụng. Mọi boson đều có thể ở trong cùng một trạng thái nên chúng có thể di chuyển một cách hữu hiệu mà không bị ma sát.

Trong hiện tượng siêu dẫn, lực hút giữa các electron bắt nguồn từ sự biến dạng của mạng tinh thể. Ở nhiệt độ thấp, 2 electron hút nhau giống như hai khối lượng hút nhau do sự biến dạng của tấm nệm không-thời gian. Tuy vậy, trong trường hợp chất rắn, sự biến dạng này bị lượng tử hoá. Bằng cách tiếp cận này, Bardeen, Cooper và Schrieffer đã giải thích cho việc chất siêu dẫn không còn điện trở, tính nghịch từ hoàn toàn của chúng ($\mu_r = 0$), sự hiện hữu của vùng cấm, sự chuyển pha bậc 2 về điện dẫn suất bình thường ở một nhiệt độ đặc biệt và sự phụ thuộc của nhiệt độ này vào khối lượng của các đồng vị. Họ đã nhận giải Nobel năm 1972 cho công trình này.*

Còn một loại chuyển động không ma sát nữa là *siêu lưu*. Năm 1937, Pyotr Kapitsa đã biết rằng helium bình thường tức là ^{4}He, khi chuyển pha ở nhiệt độ 2.17 K, là một *siêu lưu chất*: chất lỏng di chuyển không ma sát qua các thiết bị, đường ống, v.v... Nói chính xác hơn, helium lỏng vẫn còn là một hỗn hợp một thành phần siêu lưu chất và một thành phần bình thường; chỉ có thành phần siêu lưu là chuyển động không ma sát. Siêu lưu chất helium còn có thể, sau một tác động ban đầu, chảy qua vật cản, như thành ly, hay chảy tràn ra ngoài chai. Hiệu ứng siêu lưu nổi tiếng được trình bày trong Hình 70. Hiện tượng siêu lưu xảy ra do nguyên tử ^{4}He là một boson. Do đó không cần có sự ghép cặp để có khả năng chuyển động không ma sát. Công trình này mang lại cho Kapitsa một giải Nobel năm 1978.

* Đối với John Bardeen (b. 1908 Madison, d. 1991 Boston), đây là giải thứ 2, sau khi ông nhận được giải Nobel vật lý đầu tiên năm 1956, cùng với William Shockley và Walter Brattain, nhờ sự khám phá ra transistor. Giải Nobel đầu cũng là một vấn đề của Bardeen, khi ông cần thời gian để nghiên cứu về siêu dẫn. Một trong những biện pháp là ông giảm mọi thị phi xung quanh đến mức tối thiểu để có thể tập trung vào bài toán siêu dẫn. Cũng cần nói thêm Bardeen dẫn đầu cùng với Frederick Sanger và Marie Curie. Sanger đoạt giải Nobel hoá học năm 1958 và cùng đoạt giải thứ 2 với Walter Gilbert năm 1980; Marie Curie đoạt giải đầu tiên cùng với chồng của bà và giải thứ 2 của riêng bà trong hai lĩnh vực khác nhau.



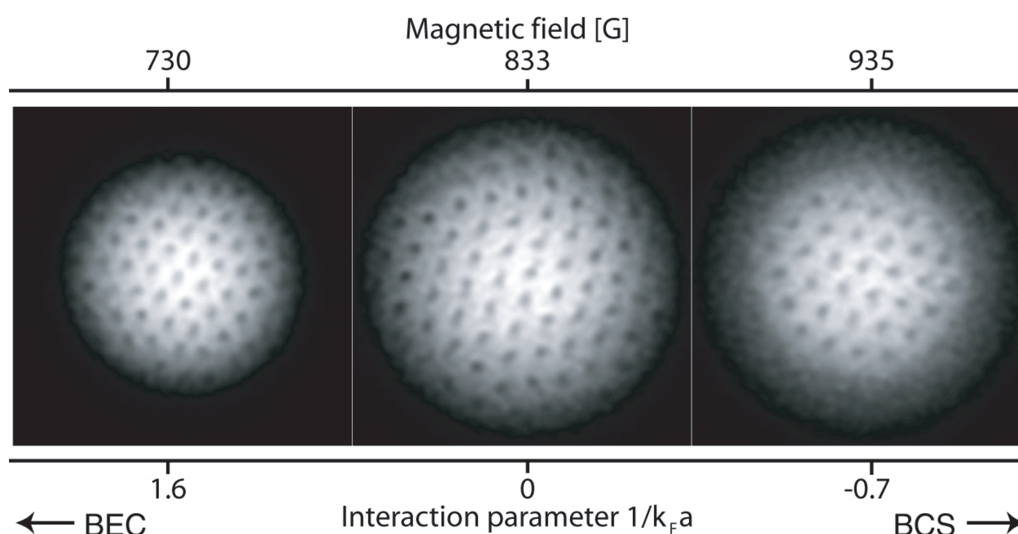
HÌNH 70 Tính siêu lưu của helium 4 có thể được sử dụng để tạo ra hiệu ứng vòi phun trên một cái đĩa có các lỗ rất nhỏ mà helium siêu lưu có thể đi qua nhưng chất lỏng thông thường thì không. Helium 4 siêu lưu có nhiệt dẫn suất lớn và chảy về phía bị nung nóng để làm cho nó nguội lại, trong khi chất lỏng thông thường không thể xuyên ngược qua các lỗ nhỏ. Hiệu ứng cơ nhiệt này tạo ra vòi phun. (© Pacific Institute of Theoretical Physics)

Năm 1972, Richardson, Lee và Osheroff đã phát hiện ngay cả ^{3}He cũng là siêu lưu chất, chỉ cần nhiệt độ thấp hơn 2.7 mK. ^{3}He là fermion và cần *ghép cặp* để có tính siêu lưu. Đúng ra dưới 2.2 mK, ^{3}He là siêu lưu chất theo 2 cách khác nhau; người ta gọi đó là phase A và phase B. Các nhà bác học này đã nhận giải Nobel năm 1996 cho công trình này.

Trong trường hợp của ^{3}He, các lý thuyết gia đã nhanh chân hơn các nhà thực nghiệm. Lý thuyết về siêu dẫn nhờ ghép cặp đã được điều chỉnh để giải thích cho hiện tượng siêu lưu vào năm 1958 – trước khi có dữ liệu thực nghiệm của Bohr, Mottelson và Pines. Lý thuyết này đã được Anthony Leggett điều chỉnh và mở rộng.* Tương tác giữa các nguyên tử ^{3}He, hoạt động nền tảng dẫn tới hiện tượng siêu lưu hoá ra là tương tác spin-spin.

Hiện tượng siêu lưu cũng đã được ghi nhận trong nhiều *chất khí*, mặc dù ở nhiệt độ thấp hơn rất nhiều. Việc nghiên cứu hành trạng của chất khí ở những nhiệt độ rất thấp đã trở nên phổ biến trong các năm gần đây. Khi đó bước sóng Broglie gần với khoảng cách giữa các nguyên tử, khí boson tạo thành thể ngưng tụ Bose–Einstein. Nhiều nhóm vật lý

* Aage Bohr, con của Niels Bohr, và Ben Mottelson nhận giải Nobel năm 1975, Anthony Leggett năm 2003.



HÌNH 71 Mạng các xoáy trong hơi lithium lạnh, cho thấy cấu trúc lượng tử hoá của chúng (© Andre Schirotzek).

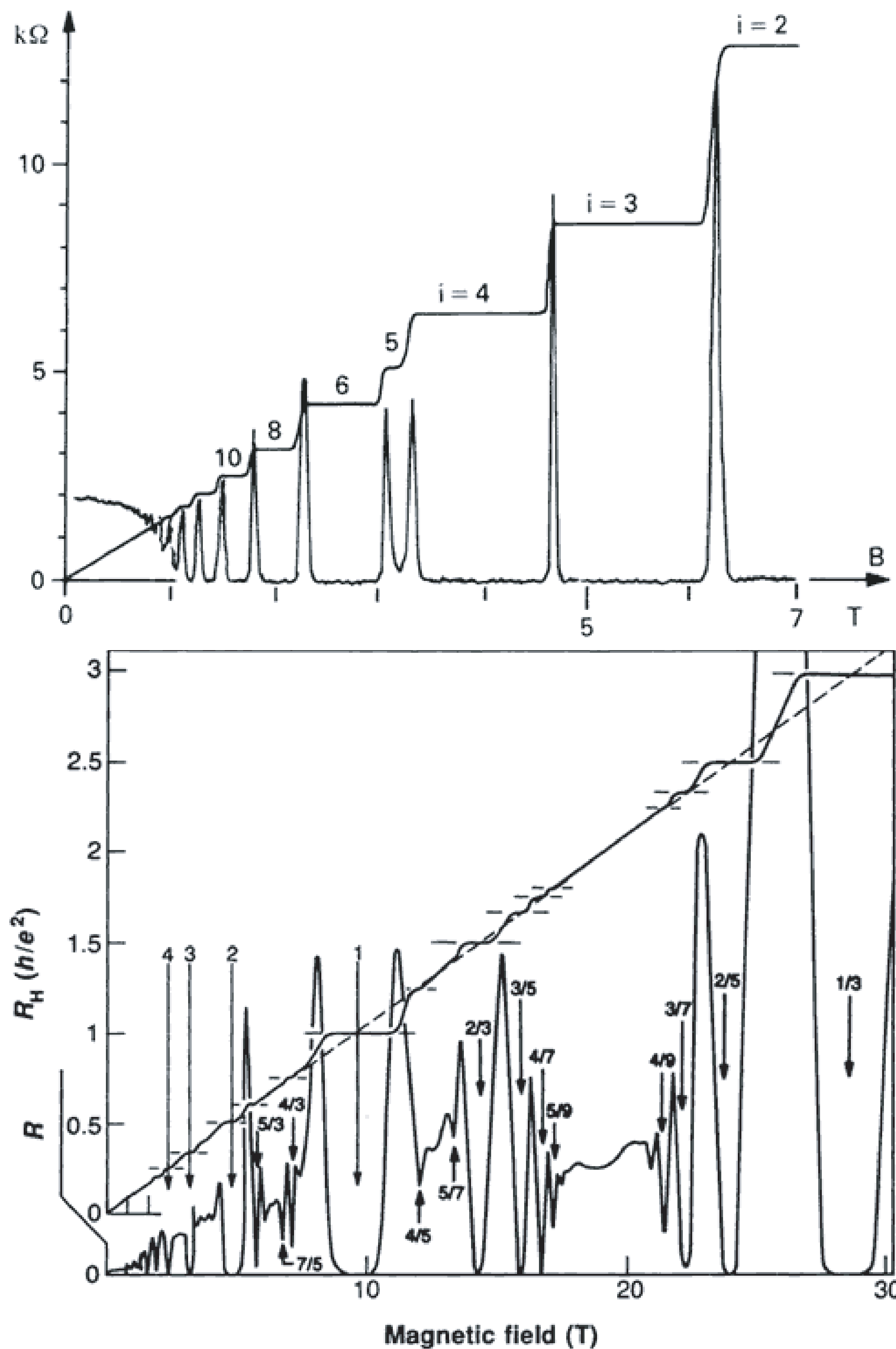
gia đã tạo ra được các trạng thái đó lần đầu tiên vào năm 1995; nhóm của Eric Cornell và Carl Wieman sử dụng ^{87}Rb, Rand Hulet và cộng sự sử dụng ^{7}Li còn Wolfgang Ketterle và cộng sự sử dụng ^{23}Na. Đối với khí fermion, khí suy biến đầu tiên, ^{40}K, đã được nhóm Deborah Jin quan sát thấy năm 1999. Năm 2004, nhóm đó cũng đã quan sát được thể ngưng tụ đầu tiên của khí Fermi, sau khi các nguyên tử potassium ghép cặp. Tất cả các thể ngưng tụ này đều thể hiện tính siêu lưu.

Siêu lưu chất là các chất quyến rũ. Trong siêu lưu chất có các xoáy. Nhưng các xoáy không có tính chất như trong các chất lỏng thông thường. Trong siêu lưu chất ^{3}He- phase B, các xoáy *được lượng tử hoá*: các xoáy chỉ hiện hữu tương ứng với các bội của lưu số sơ cấp $h/2m_{^3\mathrm{He}}$. Đây cũng là trường hợp của chất siêu dẫn. Các xoáy trong siêu lưu chất có moment động lượng được lượng tử hoá. Tác dụng của sự lượng tử hoá có thể thấy trong Hình 71. Trong siêu lưu chất, các xoáy này cuộn mãi mãi! Giống như trong chất lỏng thông thường, trong siêu lưu chất cũng phân ra dòng chảy lớp và dòng chảy rối. Sự chuyển pha giữa hai chế độ thông qua trung gian của *các xoáy* trong chất lỏng.Các Xem 76 nghiên cứu hiện nay tập trung vào sự tìm hiểu cách hoạt động của các xoáy và cách chúng tạo ra sự chuyển phase.

Hiệu ứng Hall lượng tử phân số

Hiệu ứng Hall lượng tử phân số là một trong các khám phá thú vị nhất trong Khoa học vật liệu và có lẽ trong cả lĩnh vực Vật lý. Hiệu ứng này liên quan tới dòng electron trong Xem 77 một mặt 2 chiều. Năm 1982, Robert Laughlin đã tiên đoán rằng trong hệ này người ta sẽ quan sát được các vật thể có điện tích $e/3$. Lời tiên đoán kỳ dị này được kiểm chứng vào Xem 78 năm 1997.

Trang 97 Ta đã biết hiệu ứng Hall (cổ điển) ở trên. Câu chuyện được tiếp nối bằng khám phá Xem 79 của Klaus von Klitzing về hiệu ứng Hall *lượng tử*. Năm 1980, Klitzing và cộng sự đã tìm thấy trong các hệ 2 chiều ở nhiệt độ thấp – khoảng 1 K – điện dẫn suất S, hay điện dẫn



HÌNH 72 Hiệu ứng Hall lượng tử nguyên (hình trên) và Hiệu ứng Hall lượng tử phân số (hình dưới): mỗi đồ thị đem lại một giải Nobel. Các đồ thị cho thấy sự biến thiên của trở kháng Hall và trở kháng Ohm theo từ trường ở nhiệt độ rất thấp. Độ cao của các bước được lượng tử hoá theo số nguyên hay các phân số đơn giản của $h/e^2 = 25.812\,807\,557(18)\,\mathrm{k\Omega}$. Các thí nghiệm Hall lượng tử giúp ta xác định được giá trị chính xác nhất hiện nay của hằng số của tự nhiên này.

suất Hall được lượng tử hoá thành bội của lượng tử độ dẫn

$$S = n\frac{e^2}{h} . \qquad (11)$$

Giải thích điều này cũng không khó: nó là sự tương tự lượng tử của hiệu ứng Hall cổ điển, mô tả quy luật biến đổi của độ dẫn khi có từ trường. Điện trở tương ứng sẽ là

$$R = \frac{1}{n}\frac{h}{e^2} = \frac{1}{n} 25,812\,807\,557(18)\,\mathrm{k}\Omega . \qquad (12)$$

Các giá trị này độc lập với vật liệu, nhiệt độ hay từ trường. Chúng là các hằng số của thiên nhiên. Von Klitzing đã nhận giải Nobel vật lý nhờ khám phá này vì hiệu ứng không được mong đợi này giúp ta đo một cách chính xác hằng số cấu trúc tinh tế và cũng giúp ta tạo ra các máy đo được các hiệu thế nhỏ nhất. Khám phá của ông tạo ra một phong trào nghiên cứu sôi động.

Chỉ 2 năm sau đó, vào năm 1982, người ta đã nhận thấy rằng trong một từ trường Xem 80 cực mạnh, ở nhiệt độ cực thấp, điện dẫn suất có thể thay đổi từng bậc *1/3*. Ngay sau đó, người ta tìm thấy các phân số kỳ lạ hơn. Đúng ra mọi phân số có dạng $m/(2m+1)$ hay $(m+1)/(2m+1)$, m là số nguyên, đều có thể xảy ra. Đây là *Hiệu ứng Hall lượng tử phân* Xem 77 *số*. Trong một bài báo quan trọng, Robert Laughlin đã giải thích hiện tượng này bằng cách giả sử rằng khí electron có thể hình thành các trạng thái tập thể, biểu diễn các kích thích của chuẩn hạt có điện tích $e/3$. Điều này đã được khẳng định bằng thực nghiệm sau đó 15 năm và đã mang lại cho ông một giải Nobel. Ta đã thấy trong nhiều trường hợp sự lượng tử hoá được phát hiện nhiều nhất qua việc đo các tiếng ồn; trong trường hợp này, sự khẳng định rõ ràng nhất đến từ việc đo tiếng ồn của dòng điện.

Những thí nghiệm tiếp theo đã chứng minh cho lập luận của Laughlin. Ông đã tiên đoán được sự xuất hiện của một dạng chuẩn hạt *phức hợp* mới, được tạo thành từ electron và từ một hay nhiều lượng tử từ thông. Nếu một electron liên kết với một số *chẵn* lượng tử, phức hợp là một fermion và đưa tới hiệu ứng Hall lượng tử *nguyên* của Klitzing. Nếu một electron liên kết với một số *lẻ* lượng tử, phức hợp là một boson và đưa tới hiệu ứng Hall lượng tử *phân số*. Các chi tiết lý thuyết và thực nghiệm của các chuẩn hạt này có lẽ là mặt phức tạp và quyến rũ nhất của Vật lý, nhưng tìm hiểu chúng thì lại dẫn ta đi quá xa mục tiêu thám hiểm của mình.

Năm 2007, một chương mới trong câu truyện lại được Andre Geim và cộng sự cùng Xem 81 với một nhóm thứ 2 mở ra, khi họ khám phá một loại hiệu ứng Hall lượng tử mới ở nhiệt Trang 98 độ phòng. Họ đã sử dụng graphene, tức là các lớp graphite đơn nguyên tử và tìm được một tương tự tương đối tính của hiệu ứng Hall lượng tử. Hiệu ứng này còn bất ngờ hơn các hiệu ứng trước, cũng rất thú vị, và có thể thực hiện trên mặt bàn. Các nhóm nghiên cứu này là các ứng viên triển vọng của một cuộc du hành tới Stockholm.*

Chúng ta học được điều gì từ các kết quả này? Các hệ 2 chiều có các trạng thái tuân theo các quy luật khác với các hệ 3 chiều. Các điện tích phân số trong chất bán dẫn không có liên hệ gì với quark. Quark, các cấu tử của proton và neutron, có điện tích $e/3$ và $2e/3$. Có thể quark vận hành theo một cơ chế tương tự với hiện tượng siêu dẫn? Ở điểm này

* Tiên đoán này có từ tháng 12-2008 và trở thành hiện thực vào tháng 12-2010.

BẢNG 8 Vật chất ở nhiệt độ thấp nhất.

Phase	Loại	Hành trạng ở nhiệt độ thấp	Thí dụ
Chất rắn	chất dẫn điện	tính siêu dẫn	chì, MgB_2 (40 K)
		chất phản thiết từ	chromium, MnO
		chất thiết từ	sắt
	chất cách điện	chất nghịch từ	
Chất lỏng	boson	Sự ngưng tụ Bose–Einstein, tức siêu lưu	^{4}He
	fermion	sự ghép cặp, rồi BEC, tức là siêu lưu	^{3}He
Chất khí	boson	Sự ngưng tụ Bose–Einstein	^{87}Rb, ^{7}Li, ^{23}Na, H, ^{4}He, ^{41}K
	fermion	sự ghép cặp rồi ngưng tụ Bose–Einstein	^{40}K, ^{6}Li

ta chưa thể khẳng định vì chưa có câu trả lời thoả đáng; ta sẽ trở lại chủ đề này vào cuối cuộc hành trình.

Vật chất sẽ vận hành như thế nào ở nhiệt độ thấp?

Hành trạng của vật chất ở nhiệt độ thấp có nhiều thể hiện lý thuyết và thực nghiệm. Vấn đề đầu tiên là ở nhiệt độ thấp thì vật chất có luôn luôn ở trạng thái rắn hay không. Câu trả lời là không: mọi phase đều có thể hiện hữu ở nhiệt độ thấp, như ta thấy trong Bảng 8.

Khi ở nhiệt độ thấp thì vật chất có thể cách điện hay siêu dẫn. Sau cùng, ta cũng muốn biết về từ tính của vật chất ở nhiệt độ thấp. Ta đã biết rằng vật chất không thể có tính thuận từ ở nhiệt độ rất thấp. Ở nhiệt độ thấp nhất, vật chất có thể là chất thiết từ, nghịch từ hay phản thiết từ.

Laser và các máy phát boson vector có spin bằng 1

Xem 82

Photon là các boson vector; một ngọn đèn là một máy phát boson vector. Tất cả đèn ta đang có chia làm 3 loại. *Đèn nóng sáng* sử dụng sự phát xạ từ một chất rắn có nhiệt độ cao, *đèn phóng điện trong chất khí* sử dụng sự kích thích của các nguyên tử, ion hay phân tử do va chạm và *đèn tái hợp* phát ra ánh sáng (lạnh) do sự tái hợp của các điện tích trong chất bán dẫn hay trong chất lỏng. Loại sau là loại đèn duy nhất tìm thấy trong các sinh hệ. Các nguồn sáng khác là *laser*. Mọi nguồn sáng đều dựa trên các hiệu ứng lượng tử nhưng đối với laser thì mối liên hệ này là điều hiển nhiên. Bảng sau đây cho ta một tổng quan về các loại nguồn sáng chính và công dụng của chúng.

BẢNG 9 Các loại đèn và laser.

Loại đèn, ứng dụng	Bước sóng	Độ sáng hay công suất	Chi phí	Tuổi thọ
Đèn nóng sáng				
Đèn dầu, đèn cầy, dùng để chiếu sáng	màu trắng	lên tới 500 lm	1 cent/lm	5 h

BẢNG 9 Các loại đèn và laser (tiếp theo).

Loại đèn, ứng dụng	Bước sóng	Độ sáng hay công suất	Chi phí	Tuổi thọ
Đèn tròn tim Tungsten, đèn halogen, dùng để chiếu sáng	300 tới 800 nm	5 tới 25 lm/W	0.1 cent/lm	700 h
Ngôi sao, sản xuất các nguyên tố nặng	toàn bộ quang phổ	lên tới 10^{44} W	miễn phí	lên tới hàng tỷ năm
Đèn phóng điện trong chất khí				
Đèn Neon, dùng trong quảng cáo	màu đỏ			lên tới 30 kh
Đèn thuỷ ngân, dùng để chiếu sáng	quang phổ và tia tử ngoại	45 tới 110 lm/W	0.05 cent/lm	3000 tới 24 000 h
Đèn halogenide kim loại (ScI_3 hay 'ánh sáng xenon', NaI, DyI_3, HoI_3, TmI_5) dùng trong đèn xe hơi và chiếu sáng	màu trắng	110 lm/W	1 cent/lm	lên tới 20 kh
Đèn Natrium áp suất thấp dùng làm đèn đường	589 nm màu vàng	200 lm/W	0.2 cent/lm	lên tới 18 kh
Đèn Natrium áp suất cao dùng làm đèn đường	màu vàng đa sắc	120 lm/W	0.2 cent/lm	lên tới 24 kh
Hồ quang Xenon, dùng trong đèn chiếu film	màu trắng	30 tới 150 lm/W, lên tới 15 kW		100 tới 2500 h
Ngôi sao, sản xuất các nguyên tố nặng	nhiều vạch	lên tới 10^{20} W	miễn phí	lên tới hàng tỷ năm
Đèn tái hợp				
Sinh phát quang trong rừng, thí dụ như do *Armillaria mellea*, *Neonothopanus gardneri* hay các nấm sinh phát quang	màu lục	chỉ đủ nhìn thấy	miễn phí	nhiều năm
Đom đóm, để quyến rũ bạn tình	vàng lục		miễn phí	*c.* 10 h
Mực ở biển sâu, *Taningia danae*, tạo ra các ánh chớp để làm cho con mồi bối rối	màu đỏ	*c.* 1 W	miễn phí	nhiều năm
Cá ở biển sâu, như *cá cần câu*, thu hút con mồi hay tìm bạn tình	màu trắng	*c.* 1 μW	miễn phí	nhiều năm
Cá medusae ở biển sâu, gây sự chú ý của các loại cá ăn thịt khác	lam và các màu khác		miễn phí	nhiều năm
Diode phát quang, sử dụng trong đo lường, chiếu sáng và truyền thông	màu đỏ, lục, lam, tử ngoại	lên tới 150 lm/W, lên tới 5 W	10 cent/lm	15k tới 100 kh

BẢNG 9 Các loại đèn và laser (tiếp theo).

Loại đèn, ứng dụng	Bước sóng	Độ sáng hay công suất	Chi phí	Tuổi thọ
Nguồn bức xạ synchrotron				
Nguồn synchrotron Electron	từ tia X tới sóng vô tuyến	dạng xung	nhiều MEuro	nhiều năm
Một số ngôi sao	phổ rộng		miễn phí	hàng ngàn năm
Laser hay đèn trắng lý tưởng	ánh sáng khả kiến	*c.* 300 lm/W	0	∞
Laser hay đèn màu lý tưởng	lục	683 lm/W	0	∞
Laser khí				
Laser He-Ne (lỗi thời), dùng làm thí nghiệm trong trường học	632.8 nm	550 lm/W	2000 cent/lm	300 h
Laser Argon, dùng trong bơm laser và trình diễn laser, đã lỗi thời	nhiều vạch lam và lục	lên tới 100 W	10 kEuro	
Laser Krypton, dùng trong bơm laser và trình diễn laser, đã lỗi thời	nhiều vạch lam, lục, đỏ	50 W		
Laser Xenon	nhiều vạch hồng ngoại, khả kiến và cận tử ngoại	20 W		
Laser Nitrogen (hay 'không khí'), dùng trong bơm của các laser khác, dành cho những người đam mê	337.1 nm	dạng xung lên tới 1 MW	giảm còn vài trăm Euro	tuỳ tuổi thọ của điện cực kim loại
Laser hơi nước, dành cho việc nghiên cứu, đã lỗi thời	nhiều vạch từ 7 tới 220 µm, thường là 118 µm	liên tục 0.5 W, dạng xung thì lớn hơn	vài kEuro	
Laser CO_2, dùng để cắt, hàn và phẫu thuật	10.6 µm	liên tục lên tới 100 kW, dạng xung lên tới 10 TW	*c.* 100 Euro/W	1500 h
Laser Excimer, dùng để quang khắc trong việc sản xuất các chip silic, phẫu thuật mắt, bơm laser, trị bệnh vẩy nến, kết lắng bằng laser	193 nm (ArF), 248 nm (KrF), 308 nm (XeCl), 353 nm (XeF)	100 W	10 tới 500 kEuro	nhiều năm
Laser hơi kim loại (Cu, Cd, Se, Ca, Ag, Au, Mn, Tl, In,Hg)				

BẢNG 9 Các loại đèn và laser (tiếp theo).

Loại đèn, ứng dụng	Bước sóng	Độ sáng hay công suất	Chi phí	Tuổi thọ
Laser hơi Đồng, dùng để bơm, chụp ảnh, trị bệnh da liễu, cắt, dựng hình nghệ thuật và nghiên cứu thăm dò	248 nm, 511 nm và 578 nm	xung lên tới 5 MW	10 kEuro	1 khour
Laser Cadmium, dùng trong in ấn, sắp chữ, nhận biết dollar Mỹ giả	325 nm và 442 nm	lên tới 200 mW	12 kEuro	10 kh
Laser hơi Vàng, dùng trong nghiên cứu thăm dò, trị bệnh da liễu	627 nm	xung lên tới 1 MW	từ vài trăm Euro trở lên	
Laser khí hoá học				
Laser HF, DF và oxygen-iod, dùng làm vũ khí, được bơm bằng các phản ứng hoá học, đã lỗi thời	1.3 tới 4.2 μm	lên tới MW trong chế độ liên tục	trên 10 MEuro	không xác định
Laser màu nhuộm lỏng				
Laser rhodamine, stilbene, coumarin v.v..., dành cho các ứng dụng quang phổ học và y học	điều hưởng được, phạm vi tuỳ thuộc vào phẩm màu, từ 300 tới 1100 nm	lên tới 10 W	10 kEuro	phụ thuộc vào màu nhuộm
Beer, vodka, whiskey, mứt lỏng và nhiều chất lỏng khác được dùng làm vật liệu laser	Hồng ngoại, khả kiến	thường là mW	1 kEuro	vài phút
Laser thể rắn				
Laser hồng ngọc (lỗi thời), dùng trong phép toàn ký và tẩy hình xăm	694 nm		1 kEuro	
Laser Nd:YAG (neodymium:yttrium nhôm granate), dùng để xử lý vật liệu, phẫu thuật, bơm, định tầm, đo vận tốc chất lỏng, cũng được sử dụng với tần số nhân đôi (532 nm), nhân 3 (355 nm) nhân 4 (266 nm), còn được sử dụng làm laser phiến	1064 nm	liên tục 10 kW, xung 300 MW	50 tới 500 kEuro	1000 h
Laser Er:YAG, dùng trị bệnh da liễu	2940 nm			
Laser Ti:lam ngọc, xung cực ngắn dùng trong quang phổ học, LIDAR, và nghiên cứu	650 tới 1200 nm	liên tục 1 W, xung 300 TW	từ 5 kEuro trở lên	
Laser Alexandrite, dùng trong việc chế tạo máy bằng laser, trị bệnh da liễu, LIDAR	700 tới 840 nm			

BẢNG 9 Các loại đèn và laser (tiếp theo).

Loại đèn, ứng dụng	Bước sóng	Độ sáng hay công suất	Chi phí	Tuổi thọ
Laser Cr:LiSAF		dạng xung 10 TW, xuống tới 30 fs		
Laser Cr:YAG	1.35 tới 1.6 µm	dạng xung, xuống tới 100 fs		
Laser Cr:Forsterite, dùng để chụp cắt lớp quang	1200 tới 1300 nm	dạng xung, nhỏ hơn 100 fs		
Laser sợi thuỷ tinh có pha Erbium, sử dụng trong quang truyền thông (cáp biển), máy khuếch đại ánh sáng	1.53 tới 1.56 µm			nhiều năm
Laser Perovskite, như $Co:KZnF_3$, dùng trong việc nghiên cứu	cận hồng ngoại, điều hưởng được, 1650 tới 2070 nm	100 mW	2 kEuro	
Laser tâm màu, dùng trong quang phổ học (NaCl:OH-, KI:Li, LiF)	phạm vi điều hưởng được từ 1.2 tới 6 µm	100 mW	20 kEuro	
Laser bán dẫn				
Diode Laser GaN, dùng trong kỹ thuật quang ký	355 tới 500 nm, phụ thuộc vào tạp chất	lên tới 150 mW	vài Euro tới 5 kEuro	*c.* 10 000 h
Diode Laser AlGaAs, dùng trong kỹ thuật quang ký, bút trình chiếu, truyền dữ liệu, rào laser, máy đọc mã vạch (thường hay hốc đứng)	620 tới 900 nm, phụ thuộc vào tạp chất	lên tới 1 W	ít hơn 1 Euro tới 100 Euro	*c.* 10 000 h
Diode Laser InGaAsP, dùng trong việc truyền thông bằng sợi quang, bơm laser, xử lý vật liệu, ứng dụng y học (thường và hốc đứng hay VCSEL)	1 tới 2.5 µm	lên tới 100 W	dưới 1 Euro tới vài ngàn Euro	lên tới 20 000 h
Diode Laser muối chì (PbS/PbSe), dùng trong quang phổ học, phát hiện chất khí	3 tới 25 µm	0.1 W	vài trăm Euro	
Laser thác lượng tử, dùng trong việc nghiên cứu và quang phổ học	2.7 tới 350 µm	lên tới 4 W	*c.* 10 kEuro	*c.* 1 000 h
Laser silic lai, dùng trong việc nghiên cứu	Hồng ngoại	nW	0.1 MEuro	
Laser electron tự do				

BẢNG 9 Các loại đèn và laser (tiếp theo).

Loại đèn, ứng dụng	Bước sóng	Độ sáng hay công suất	Chi phí	Tuổi thọ
Sử dụng trong Khoa học vật liệu	5 nm tới 1 mm	liên tục 20 kW, xung trong khoảng GW	10 MEuro	nhiều năm
Laser được bơm bằng các phản ứng hạt nhân				
Chỉ được sử dụng trong tiểu thuyết giả tưởng và để móc túi bên quân đội khờ khạo				

Từ đèn tới laser

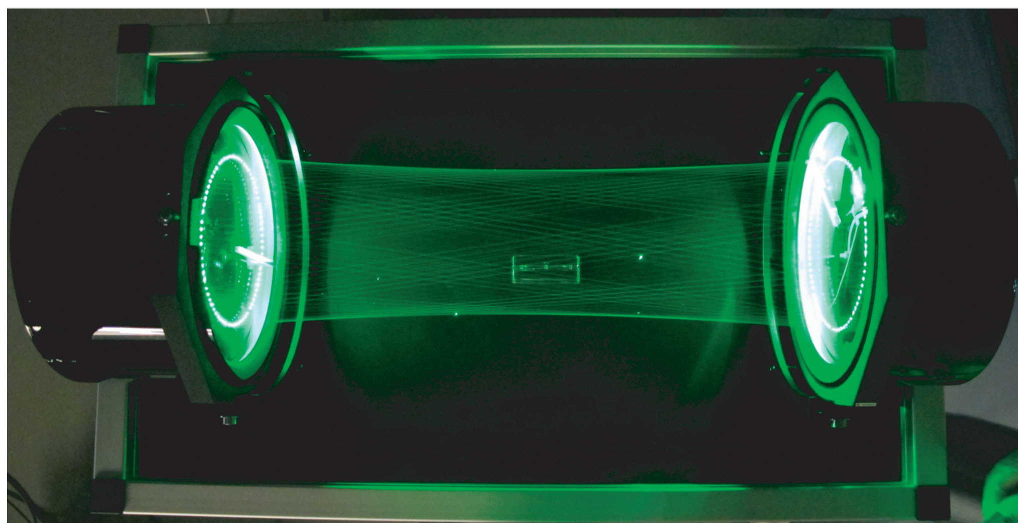
Phần lớn đèn ở thể rắn là LED. Sự tiến bộ vượt bậc về độ sáng của LED có thể dẫn đến việc giảm mạnh sự tiêu thụ năng lượng trong tương lai nếu chi phí giảm đi đáng kể. Nhiều kỹ sư đang tập trung vào lĩnh vực này. Vì chi phí là cách ước lượng tốt cho nhu cầu năng lượng trong sản xuất, bạn có thể ước lượng được loại đèn nào thân thiện với môi trường nhất hay không?

Câu đố 58 s

Không ai nghĩ nhiều về đèn đuốc cho tới lúc Albert Einstein và một số vật lý gia vĩ đại khác như Theodore Maiman và Hermann Haken nhập cuộc. Nhiều nhà nghiên cứu sau đó nhận được giải Nobel nhờ những thành quả dựa trên công trình của họ. Vào năm 1916, Einstein đã chứng tỏ rằng có 2 loại nguồn sáng – hay nói tổng quát là bức xạ điện từ – cả 2 đều thực sự 'tạo ra' ánh sáng. Ông đã chứng tỏ rằng mọi đèn có độ sáng được điều chỉnh để vượt qua một ngưỡng cường độ nào đó sẽ thay đổi hành trạng của nó. Cơ chế chính của sự phát xạ ánh sáng sẽ thay đổi từ sự phát xạ tự phát sang *phát xạ kích động*. Bây giờ những cái đèn đặc biệt như vậy được gọi là một *laser* (các chữ 'se' trong laser là chữ viết tắt của 'stimulated emission'). Sau một cuộc chạy đua nghiên cứu cuồng nhiệt khắp thế giới, năm 1960 Maiman là người đầu tiên tạo ra một laser phát ra ánh sáng khả kiến. (Người ta đã biết đến *Maser*, máy phát ra vi ba, từ nhiều thập kỷ trước.) Tóm lại, Einstein và các vật lý gia khác đã chứng tỏ rằng khi một ngọn đèn được điều chỉnh một cách hiệu quả nó sẽ thành một laser. Laser gồm có nhiều vật liệu phát sinh và khuếch đại ánh sáng đi cùng với một cơ chế bơm năng lượng vào bên trong nó. Vật liệu có thể là chất khí, chất lỏng hay chất rắn; quá trình bơm có thể sử dụng dòng điện hay ánh sáng. Thông thường, vật liệu được đặt giữa 2 gương, để gia tăng hiệu suất của việc sản xuất ánh sáng. Laser thông dụng là các laser bán dẫn (chủ yếu là LED có bơm mạnh), laser He–Ne (đèn neon có bơm mạnh), laser lỏng (đom đóm có bơm mạnh) và laser hồng ngọc (tinh thể phát quang có bơm mạnh). Nhiều vật liệu có thể được sử dụng để tạo ra các laser với mục đích giải trí, bao gồm nước, beer và vodka.

Laser tạo ra bức xạ trong một dãy phổ từ vi ba đến tia cực tím. Chúng có tính chất đặc biệt là phát ra ánh sáng *điều hợp* trong một chùm được chuẩn trực. Do đó laser tạo được cường độ ánh sáng cao hơn bóng đèn, cho phép ta sử dụng chúng như các công cụ. Trong các laser hiện đại, độ dài điều hợp, tức là khoảng cách mà ta quan sát được hiện tượng giao thoa, có thể kéo dài hàng ngàn km. Ánh sáng có chất lượng cao như vậy được sử dụng trong các máy phát hiện sóng hấp dẫn.

Người ta đã thành thạo trong việc tạo dựng các laser. Laser được sử dụng để cắt các tấm kim loại có chiều dày lên tới 10 cm, sử dụng thay cho dao trong phẫu thuật, làm tăng



HÌNH 73 Vẻ đẹp của laser: các mành lưới mịn màng do các dây trễ của laser màu lục tạo ra (© Laser Zentrum Hannover).

độ cứng bề mặt kim loại hay làm sạch mặt đá bị ô nhiễm do khí thải của ô tô. Laser còn được sử dụng để khoan răng, đo khoảng cách, chụp ảnh mô sinh học hay nắm bắt các tế bào sống.

Một số chất khuếch đại ánh sáng mạnh đến mức việc sử dụng các gương ở 2 đầu trở nên không cần thiết. Đây là trường hợp của laser nitrogen, trong đó nitrogen, hay không khí, được sử dụng để tạo ra một chùm tia tử ngoại. Người ta đã tạo ra được laser làm bằng một nguyên tử đơn lẻ (và 2 gương); trong thí dụ này, chỉ có trung bình 11 photon Xem 83 chuyển động giữa 2 gương. Hoàn toàn là một đèn loại nhỏ. Người ta cũng đã tạo ra các laser 2 chiều phát ra ánh sáng. Chúng tạo ra một mặt ánh sáng thay vì một chùm ánh sáng.

Ba vụ gian lận về bóng đèn

Trong những năm 1990, tất cả các nhà sản xuất đèn tròn trên thế giới đều bị phạt nặng vì đã thoả thuận giữ cho tuổi thọ của bóng đèn không đổi. Việc sản xuất bóng đèn có tuổi thọ 2000 h không gặp trở ngại về kỹ thuật; tuy nhiên các nhà sản xuất thoả thuận với nhau không tăng tuổi thọ đèn lên hơn 700 h, nên đã làm cho giá bóng đèn đắt gấp 3 lần. Đây là sự gian lận về đèn tròn nổi tiếng đầu tiên.

Mặc dù bị phạt, những kẻ lừa đảo trong ngành công nghiệp bóng đèn vẫn chưa bỏ cuộc. Năm 2012, một nhà sản xuất bóng đèn lớn của Đức giải thích trong quảng cáo của họ là nguồn sáng mới của họ thọ lâu hơn đèn thông thường, là đèn chỉ sống được 500 h. Nói cách khác, không những việc phạt không cải thiện được tình hình mà các công ty bóng đèn còn *giảm* tuổi thọ của đèn của năm 2012 so với các năm 1990. Đây là sự gian lận về bóng đèn thứ 2.

Cùng với 2 sự kiện trên trong những năm 2000, các công ty bóng đèn lại vận động hành lang để ủng hộ cho nhận định sai lầm là đèn tròn đắt và tiêu thụ nhiều năng lượng. Kết quả là từ các dữ liệu sai lầm từ 2 vụ lừa đảo kia, đèn tròn bị cấm ở châu Âu, khiến

cho người tiêu dùng ở châu Âu phải mua thiết bị chiếu sáng khác đắt hơn nhiều. Điều quan trọng hơn hết, nhiều nguồn sáng đắt tiền này có hại cho mắt. Thật vậy, đèn thuỷ ngân hay LED nhấp nháy cùng với phổ màu bị giảm, làm cho thị giác của con người quá tải, là tình trạng chưa từng xảy ra đối với bóng đèn tròn sáng đều. Nói cách khác, với trò gian lận thứ 3 này, các công ty đèn tròn tăng lợi nhuận nhiều hơn, đồng thời sức khoẻ người tiêu dùng bị huỷ hoại. Có lẽ một ngày nào đó, quốc hội sẽ ít bị mua chuộc và hiểu biết hơn. Lúc đó tình hình này sẽ được cải thiện.

Ứng dụng của laser

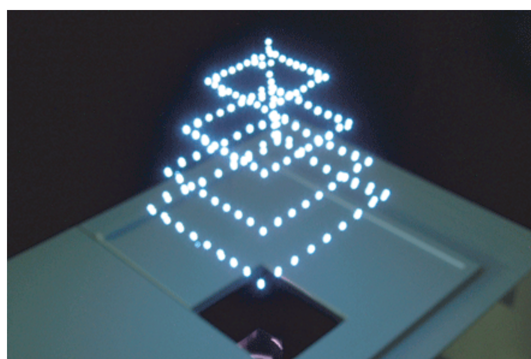
Như ta đã thấy trong Hình 74, laser có thể được sử dụng để tạo ra các vật có tính mỹ thuật – kể cả các cây đàn violin tuyệt hảo và các xe đạp độc đáo – thông qua việc dung kết polymer hay bột kim loại. Laser cũng được sử dụng trong việc tạo ra các nguyên mẫu của máy móc hay tạo dựng các mô hình kiến trúc. Laser có thể cắt giấy, kim loại, plastic và thịt.

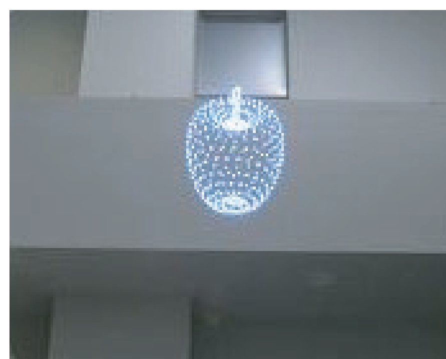
Laser được sử dụng để đọc dữ liệu từ CD và DVD, sản xuất các mạch tích hợp silic và chuyển tải các tín hiệu điện thoại qua cáp quang. Trong cuộc hành trình, ta đã gặp Quyển I, trang 407 laser làm công việc của loa. Những tiến bộ quan trọng trong những năm gần đây là các ứng dụng của các xung *laser femtosecond*. Xung femtosecond tạo ra plasma có nhiệt độ cao trong vật liệu mà chúng truyền qua; điều này có thể xảy ra trong không khí nếu các xung được điều tiêu. Hiệu ứng này đã được sử dụng để tạo ra các hình hiển thị 3 chiều lơ lửng trong không khí, như ta thấy trong Hình 74, hay trong chất lỏng. Những xung ngắn như vậy có thể được sử dụng để cắt mà không làm nóng vật liệu, thí dụ như cắt xương trong phẫu thuật xương sọ. Tính chất không nung nóng này hoàn hảo đến nỗi ta có thể dùng laser femtosecond để khắc lên dây cháy chậm hay mìn mà không làm cho phản ứng cháy nổ xảy ra. Laser femtosecond cũng đã được sử dụng để tạo ra toàn đồ của đầu người có độ phân giải cao trong chớp mắt. Gần đây các laser như vậy đã được sử dụng để hướng các tia sét đi theo con đường đã định trước; chúng là các ứng viên để Xem 84 làm cột thu lôi laser đầy hứa hẹn. Một ứng dụng đáng kinh ngạc của laser femtosecond là việc lưu trữ thông tin trong móng tay (lên tới 5 Mbit trong vài tháng), không khác với Xem 85 phương pháp mà ta đã sử dụng trong đĩa (CD-R).

Laser được sử dụng trong nhãn khoa, với kỹ thuật *chụp ảnh cắt lớp quang điều hợp*, để chẩn đoán các bệnh mắt và tim. Vào khoảng năm 2025, sẽ có thiết bị khám nghiệm dùng laser để phát hiện ung thư vú mà không gây nguy hiểm cho bệnh nhân. Cuộc chạy đua để sản xuất hệ thống hoạt động được đầu tiên, đã bắt đầu từ những năm 1990. Sẽ có thêm các ứng dụng trong y học của laser xuất hiện trong những năm sắp tới.

Laser đã được sử dụng trong các ứng dụng gần đây, cùng với phần mềm xử lý hình ảnh, để diệt muỗi đang bay; các loại laser khác diệt cỏ dại khi chúng bay trên những cánh đồng đang thu hoạch. Một ngày nào đó, những tổ hợp laser và các hệ nhận dạng như vậy sẽ được sử dụng để làm bốc hơi từng giọt mưa đang rơi; ngay khi *cây dù laser* Xem 86 như vậy xuất hiện, bạn sẽ thấy nó trong quyển sách này. Kỳ công này sẽ thành hiện thực trước năm 2022.



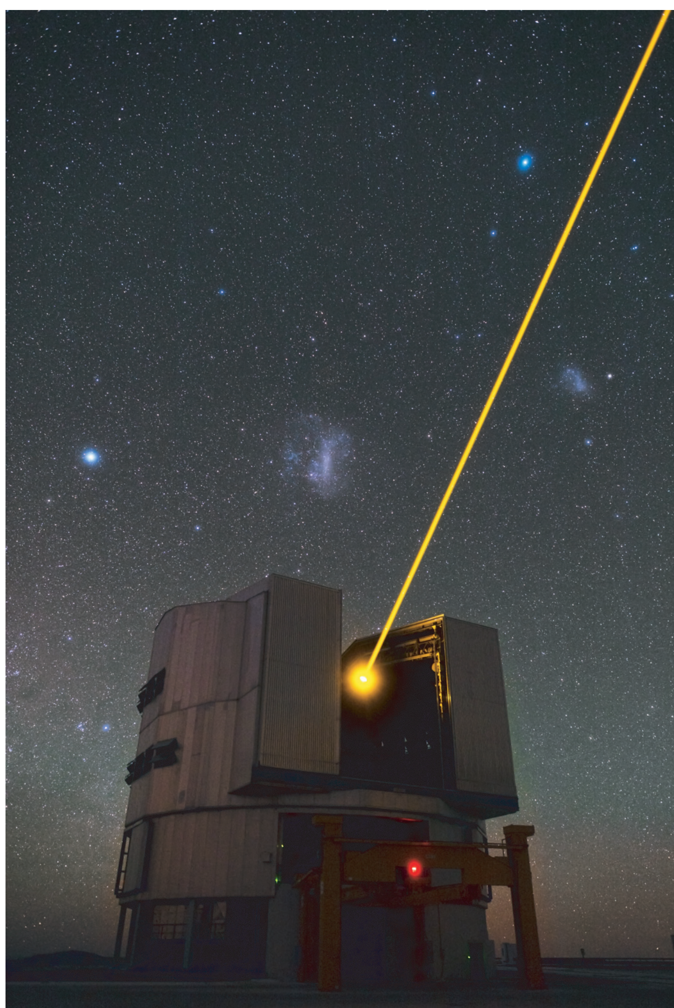




HÌNH 74 Một số ứng dụng của laser. Hình trên: đàn violin, có chất lượng âm thanh tuyệt hảo, được làm bằng một miếng polymer (trừ dây đàn và các phần màu đen) thông qua việc dung kết nhựa PEEK bằng laser của EOS, ở Krailling, Đức. Hình dưới: hình hiển thị lơ lửng trong không khí được tạo ra bằng scanner điện kế và một bộ điều tiêu nhanh (© Franz Aichinger, Burton).

Những câu đố, những ước mơ và những điều kỳ lạ về công nghệ lượng tử

Hiện nay ta thường mang nhiều thiết bị điện tử trong quần áo. Phần lớn sử dụng pin. Trong tương lai, có nhiều khả năng các thiết bị này lấy năng lượng từ cơ thể con người. Có nhiều tuỳ chọn. Người ta có thể lấy nhiệt năng bằng các cặp nhiệt điện hay năng lượng dao động bằng các máy biến năng áp điện, tĩnh điện hay điện từ. Thách thức ở đây là tạo ra các thiết bị nhỏ và rẻ. Việc khám phá xem kỹ thuật nào xuất hiện trên thị trường trước sẽ là một điều thú vị.

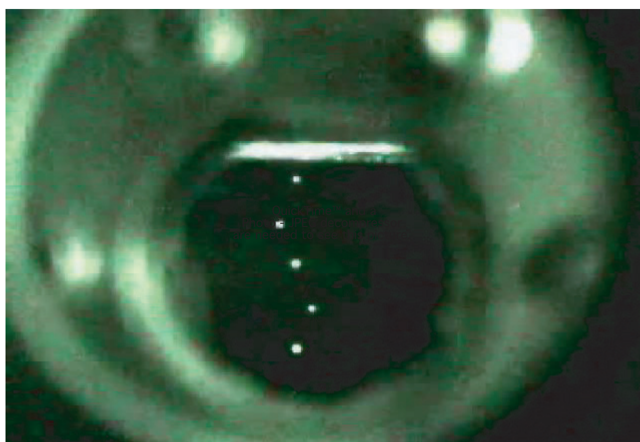


HÌNH 75 Bút laser đắt tiền nhất: một laser màu vàng 10 W được ổn định tần số ở bước sóng của đèn Na cho phép các thiên văn gia cải thiện chất lượng hình ảnh của kính thiên văn mặt đất. Bằng cách kích thích các nguyên tử Na ở độ cao 80 tới 90 km, laser cung cấp cho ta một ngôi sao dẫn đường nhân tạo được sử dụng để bổ chính cho các cuộn xoáy của khí quyển bằng cách sử dụng quang học thích ứng tích hợp trong kính thiên văn. (© ESO/Babak Tafreshi).

* *

Xem 87
Năm 2007, Humphrey Maris và học trò của ông là Wei Guo đã thực hiện một thí nghiệm khác thường: ghi hình *các electron đơn lẻ* bằng một máy quay film. Thực ra thì sự việc có một chút phức tạp, nhưng có thể tóm tắt câu chuyện, mà không xa sự thật lắm, như sau.

Maris là một chuyên gia về helium siêu lưu. Trong nhiều năm ông đã biết rằng các electron tự do trong helium siêu lưu đẩy các nguyên tử helium, và có thể di chuyển xuyên qua chất lỏng khi được bao bằng các bọt chân không nhỏ đường kính khoảng 2 nm. Ông cũng khám phá ra rằng dưới áp suất âm, các bọt này có thể to lên và nổ ra. Khi nổ chúng có thể tán xạ ánh sáng. Cùng với học trò Wei Guo, ông tiêm các electron vào helium siêu



HÌNH 76 Cách ghi ảnh của từng electron bằng một máy quay film: các electron cô lập được bao bằng những bọt nổ tung trong helium lỏng dưới áp suất âm sẽ tạo ra các chấm trắng (mpg film © Humphrey Maris).

lưu bằng một kim tungsten dưới hiệu thế âm; áp suất âm được tạo ra bằng cách điều tiêu các sóng từ 2 máy biến năng áp điện trong khối helium và chiếu ánh sáng xuyên qua helium. Khi áp suất âm đến một mức nào đó họ thấy các bọt nổ ra. Hình 76 cho ta xem phim này. Thí nghiệm này là một trong các thí nghiệm vật lý nổi bật trong thập niên qua.

* *

Có thể tạo ra một màn hình màu mềm dẻo khổ A4 với một giá thấp nhưng có chất lượng cao được không? Câu đố 59 d

* *

Có thể tạo ra pin sạc có tỷ lệ năng lượng/khối lượng so được với dầu diesel hay không? Sẽ mất bao lâu, kể từ 2014 cho tới khi công ty sau cùng, sản xuất xe điện chạy bằng pin, ngừng sản xuất?

* *

Mỗi năm ta sẽ thấy bao nhiêu công ty hứa hẹn về năng lượng miễn phí, kỹ sư hứa hẹn về xe hơi chạy bằng nước, chính trị gia hứa hẹn về năng lượng dung hợp hạt nhân hay lang băm hứa hẹn về chất phụ gia thực phẩm hay thuốc viên bọc đường chữa lành ung thư?

* *

Câu đố 60 r Có thể có hiện tượng siêu dẫn ở nhiệt độ phòng hay không?

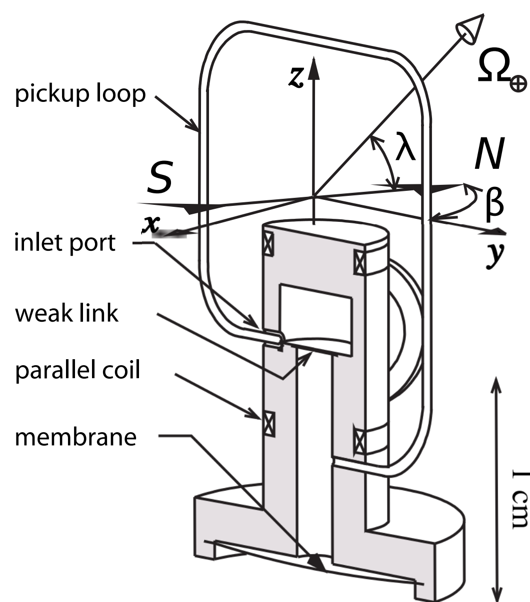
* *

Câu đố 61 r Có thể có máy khắc laser để bàn giá 1000 euro hay không?

* *

Câu đố 62 s Có thể có viễn tải các vật thông thường hay không?





HÌNH 77 Bên trong của một con quay hồi chuyển sử dụng helium siêu lưu (© Eric Varoquaux).

* *

Vật lý lượng tử không cho phép hiện tượng thần giao cách cảm. Một cơ quan hàng không vô danh đã phát hiện điều này khi trong chuyến bay Apollo 14, trên đường bay tới Mặt trăng, phi hành gia Edgar Mitchell đã kiểm tra xem thần giao cách cảm có thể là phương Xem 88 tiện truyền thông hay không. Và dĩ nhiên ông thấy thần giao cách cảm là vô dụng. Không hiểu tại sao cơ quan này lại tiêu quá nhiều tiền cho một thí nghiệm vô ích như vậy – một thí nghiệm mà ta có thể thực hiện trên mặt đất với giá tiền một cuộc gọi điện thoại.

* *

Câu đố 63 d Có thể có Khoa mật mã lượng tử ứng dụng hay không?

* *

Có thể có mạch điện tử polymer in được, thay vì mạch điện tử silic quang khắc như Câu đố 64 d thông thường hay không?

* *

Có thể có đồ chơi bay được, điều khiển bằng vô tuyến, kích thước nhỏ như côn trùng Câu đố 65 r hay không?



HÌNH 78 Màu sắc được tạo ra trên thép chỉ bằng cách chiếu laser hồng ngoại lên nó. (© Trotec Laser tại www.troteclaser.com)

* *

Xem 107
Câu đố 66 s

Bằng cách chiếu một laser vô hình và vô hại lên các xe, người ta có thể phát hiện tài xế có uống rượu hay không. Phương pháp này có thể trở nên phổ biến hay không?

* *

Xem 108

Năm 1997, Eric Varoquaux và cộng sự đã tạo ra một phiên bản lượng tử của con lắc Foucault, bằng cách sử dụng tính siêu lưu của helium. Trong công trình nghiên cứu đẹp đẽ này, họ đã làm lạnh một vòng helium lỏng nhỏ dưới nhiệt độ 0.28 K, khi đó helium chuyển động không ma sát. Trong tình trạng đó helium có thể vận hành như một con lắc Foucault. Bằng sự sắp xếp thông minh, như ta thấy trong Hình 77, họ có thể đo góc quay của helium bằng cách sử dụng tín hiệu phonon và sau cùng phát hiện ra sự tự quay của Trái đất.

* *

Laser là thiết bị lượng tử có thể được sử dụng cho nhiều ứng dụng. Hình 78 cho ta thấy cách tạo ra màu sắc trên thép bằng cách quét một chùm laser hồng ngoại được điều tiêu trên một bề mặt. Các màu này đã được tạo ra như thế nào?

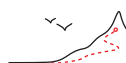
Tóm tắt về sự thay đổi thế giới do các hiệu ứng lượng tử

Nguyên tử tạo ra các liên kết. Các hiệu ứng lượng tử tạo ra phân tử, chất khí, chất lỏng và chất rắn, cũng như mọi hiệu ứng và tính chất của vật chất. Trong quá khứ, các hiệu ứng lượng tử đã được sử dụng để phát triển nhiều vật liệu có tính chất theo ý muốn, như các loại thép mới, các chất phức hợp sợi carbon mới, thuốc nhuộm mới, từ chất mới và polymer mới.

Các hiệu ứng lượng tử đã được sử dụng để phát triển Điện tử học hiện đại, laser, thiết bị phát hiện ánh sáng, thiết bị lưu trữ dữ liệu, nam châm siêu dẫn, hệ đo lường mới và máy móc sản xuất mới. Phép chụp ảnh cộng hưởng từ, máy tính điện tử, polymer, viễn thông và internet đều là kết quả của việc áp dụng các hiệu ứng lượng tử vào công nghệ.

Các hiệu ứng lượng tử sẽ tiếp tục được sử dụng để thiết kế các vật liệu và hệ thống

mới: các hạt nano mang thuốc vào cơ thể, polymer mới, các tinh thể mới, các quá trình sản xuất thân thiện với môi trường và các thiết bị y khoa mới là các ứng dụng như vậy.



Chương 3

Điện động lực học lượng tử – nguồn gốc của thực tại ảo

Khái niệm chính yếumà Thuyết trường lượng tử đã thêm vào trong việc mô tả thiên nhiên là ý tưởng *các hạt ảo*. Hạt ảo là các hạt có đời sống ngắn; chúng là một thực thể đặc biệt đối với lượng tử tác dụng. Vì lượng tử tác dụng nên hạt ảo không cần tuân theo hệ thức năng-khối lượng mà Thuyết tương đối đặc biệt đã đòi hỏi ở các hạt *thực*. Các hạt ảo có thể chuyển động nhanh hơn ánh sáng và chuyển động ngược thời gian. Dù hạt ảo có các tính chất kỳ lạ nhưng ta vẫn có thể quan sát được các hiệu ứng do chúng gây ra. Ta sẽ tìm hiểu các hiệu ứng ngoạn mục nhất.

Tàu thuyền, gương và hiệu ứng Casimir

Khi hai con thuyền nghiêng ngả trên một đỉnh sóng lớn, dù *không* có ngọn gió nào, chúng vẫn hút lẫn nhau. Hiện tượng này được minh hoạ trong Hình 79. Có lẽ người ta đã biết đến hiệu ứng này trước thế kỷ 19, khi nhiều nơi chưa có bến cảng.**

Sóng tạo ra dao động của tàu thuyền vì con thuyền hấp thu năng lượng của sóng. Khi dao động, tàu cũng phát ra sóng. Hiện tượng xảy ra chủ yếu hai bên tàu. Kết quả là đối với một con tàu đơn lẻ, sự phát xạ sóng không gây ra một tác dụng gì đến vị trí của nó. Bây giờ ta tưởng tượng có 2 con tàu dao động song song trên một đỉnh sóng dài, có bước sóng lớn hơn khoảng cách giữa 2 tàu. Do bước sóng dài, hai con tàu sẽ dao động cùng phase. Do đó chúng có thể hấp thu năng lượng của nhau. Kết quả là năng lượng mà chúng bức xạ ra ngoài sẽ đẩy chúng đến gần nhau.

Việc tính hiệu ứng này cũng không khó. Năng lượng của một con tàu dao động là

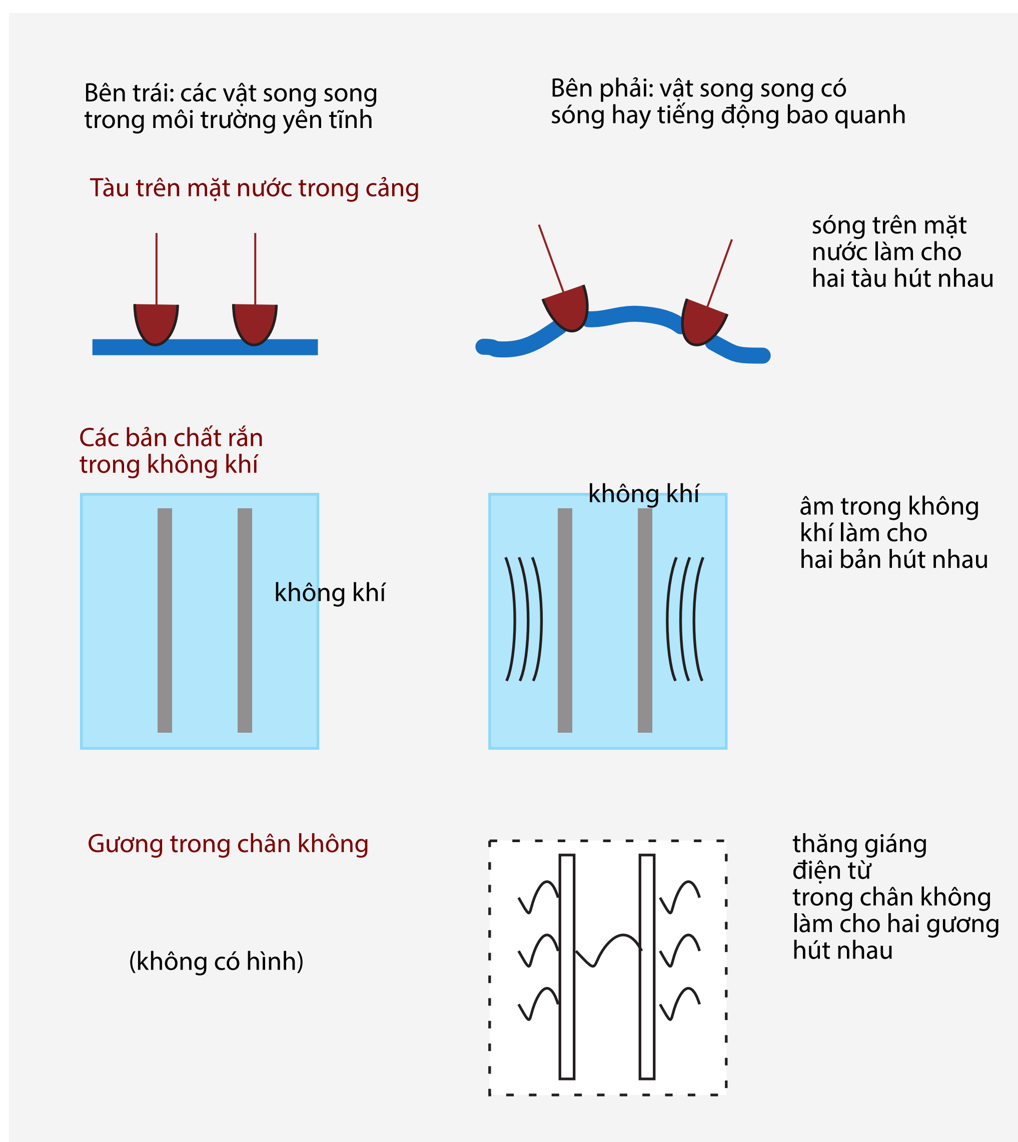
$$E = mgh\,\alpha^2/2 \qquad (13)$$

trong đó α là biên độ góc nghiêng, m là khối lượng của tàu và $g = 9,8\,\mathrm{m/s^2}$ là gia tốc trọng lực. *Chiều cao khuynh tâm h* là tham số chính đặc trưng cho một con tàu, đặc biệt là thuyền buồm; nó cho biết moment lực kéo tàu trở lại phương thẳng đứng khi nó nghiêng đi một góc α. Thông thường thuyền có h =1.5 m.

Khi tàu bị nghiêng, nó sẽ trở lại phương thẳng đứng sau một dao động tắt dần. Một dao động tắt dần được đặc trưng bằng một chu kỳ T và một hệ số phẩm chất Q. *Hệ số phẩm chất* là số dao động mà hệ thực hiện để làm giảm biên độ dao động đi e = 2.718

Xem 80

** Sipko Boersma đã công bố một bài báo, trong đó ông trình bày các điều thu lượm được từ các sổ tay hàng hải, để khuyên các thuyền trưởng tránh việc tàu thuyền hút nhau bằng cách sử dụng các thuyền có nhiều người chèo. Tuy vậy ý kiến này đã dấy lên mối nghi ngờ trong các cuộc nghiên cứu diễn ra sau đó.



HÌNH 79 Sự tương tự giữa tàu thuyền trong cảng, bản kim loại trong không khí và gương kim loại trong chân không.

lần. Nếu Q của tàu dao động và chu kỳ dao động T được cho, công suất bức xạ W là

$$W = 2\pi \frac{E}{QT} . \tag{14}$$

Ta thấy rằng lực bức xạ (áp suất bức xạ nhân cho diện tích) là W/c, trong đó c là vận tốc

Quyển III, trang 120

truyền sóng. Đối với sóng nước ở vùng nước sâu, ta có hệ thức nổi tiếng

Quyển III, trang 294

$$c = \frac{gT}{2\pi} . \tag{15}$$

Giả sử 2 tàu cạnh nhau hấp thu hoàn toàn năng lượng phát xạ của nhau, ta tìm được lực hút giữa 2 tàu là

$$ma = m2\pi^2 \frac{h\alpha^2}{QT^2} . \tag{16}$$

Thay các giá trị điển hình như $Q = 2.5$, $T = 10$ s, $\alpha = 0.14$ rad và m là 700 tấn, ta được 1.9 kN. Đỉnh sóng dài làm tàu hút lẫn nhau. Cường độ lực hút tương đối nhỏ và có thể vượt qua bằng một thuyền chèo. Mặt khác, ngay cả một làn gió nhẹ cũng sẽ dập tắt dao động này đồng thời có những hiệu ứng khác sẽ che dấu sự hút nhau này.

Sóng âm hay tiếng động trong không khí cũng cho một hiệu ứng tương tự. Chỉ cần treo 2 bản kim loại trong không khí và đặt các loa chung quanh. Âm thanh sẽ tạo ra lực hút (hay đẩy) các bản, tuỳ theo bước sóng âm không thể (hay có thể) được bản kia cảm ứng hay không.

Xem 91

Năm 1948, vật lý gia Hoà Lan Hendrik Casimir đã đưa ra một trong các tiên đoán ngoạn mục nhất của Vật lý lượng tử: hiệu ứng tương tự cũng xảy ra cho các bản kim loại đặt trong chân không. Casimir, người làm việc ở công ty điện tử Philips của Hoà Lan, muốn tìm hiểu xem tại sao ta lại khó chế tạo các đèn hình TV. Mặt phát xạ ánh sáng trong một ống tia âm cực – hay ngày nay, trong một màn hình plasma – của một TV, là chất lân quang được tạo ra bằng cách phủ các hạt trung hoà nhưng dẫn điện lên thuỷ tinh. Casimir thấy rằng các hạt bằng cách nào đó có hút nhau. Casimir bị cuốn hút vào việc tìm hiểu phương thức tương tác của các hạt trung hoà. Trong khi tìm hiểu, ông phát hiện 2 bản kim loại trung hoà (hay gương kim loại) sẽ hút nhau ngay cả trong chân không. Đây là *hiệu ứng Casimir* nổi tiếng. Casimir cũng đã xác định được cường độ lực hút giữa một quả cầu và một bản kim loại cũng như lực hút giữa 2 quả cầu. Đúng ra mọi vật thể trung hoà *dẫn điện* đều hút lẫn nhau trong chân không, với những lực phụ thuộc vào hình dạng của chúng.

Xem 92, Xem 93

Trong tất cả các trường hợp này, các thăng giáng quanh điểm 0 của điện từ trường đóng vai trò của biển, vật thể dẫn điện đóng vai trò của tàu thuyền. Casimir hiểu rằng không gian giữa 2 gương dẫn điện song song, bắt nguồn từ các ràng buộc hình học, có các thăng giáng quanh điểm 0 khác chân không. Giống như trong trường hợp 2 con tàu, kết quả là hai gương hút nhau.

Casimir tiên đoán là lực hút đối với 2 gương có khối lượng m diện tích A cách nhau một khoảng d được cho bởi công thức

$$\frac{ma}{A} = \frac{\pi^3}{120} \frac{\hbar c}{d^4} . \tag{17}$$

Hiệu ứng này là hiệu ứng lượng tử thuần tuý; trong Điện động lực học cổ điển, hai vật trung hoà không hút nhau. Hiệu ứng này yếu; ta phải khéo léo mới phát hiện ra nó. Bằng chứng thực nghiệm đầu tiên là của Derjaguin, Abrikosova và Lifshitz trong năm 1956; bằng chứng thực nghiệm thứ 2 là của Marcus Sparnaay, đồng nghiệp của Casimir

Xem 94

Xem 95 ở Philips, vào năm 1958. Hai thí nghiệm chính xác và đẹp đẽ về hiệu ứng Casimir đã Xem 96 được Lamoreaux thực hiện vào năm 1997 và Mohideen cùng với Roy thực hiện vào năm 1998; chúng khẳng định các tiên đoán của Casimir với độ chính xác là 5 % và 1 %. (Hãy nhớ rằng ở những khoảng cách rất nhỏ, sự phụ thuộc không phải là $1/d^4$, mà là $1/d^3$.) Xem 97 Tóm lại, các vật không mang điện hút nhau do các thăng giáng của điện từ trường.

Hiệu ứng Casimir khẳng định sự hiện hữu của sự thăng giáng quanh điểm 0 của điện từ trường. Nó cũng cho ta thấy Thuyết lượng tử cũng áp dụng được cho Điện từ học.

Hiệu ứng Casimir giữa 2 quả cầu tỷ lệ với $1/r^7$ nên yếu hơn tương tác giữa 2 bản song song rất nhiều. Dù điều này có vẻ kỳ lạ nhưng hiệu ứng Casimir quyến rũ rất nhiều khoa học gia tài tử nghiên cứu để tìm ra một cơ chế tương tự hiệu ứng Casimir nhằm giải thích cho lực hấp dẫn. Bạn có thể đưa ra ít nhất 3 luận cứ để chứng minh rằng điều Câu đố 67 s này không thể xảy ra mặc dù hiệu ứng này phụ thuộc vào khoảng cách hay không?

Giống trường hợp âm thanh, hiệu ứng Casimir có thể sinh ra lực đẩy thay vì lực hút. Chỉ cần một chất có độ từ thẩm cao và chất còn lại là chất dẫn điện tốt. Một tổ hợp như Xem 98 vậy sẽ đẩy nhau, như Timothy Boyer đã phát hiện năm 1974.

Trong một hốc, phát xạ tự phát sẽ bị triệt tiêu, nếu hốc nhỏ hơn bước sóng của ánh sáng phát xạ! Người ta cũng đã quan sát được hiện tượng này. Nó khẳng định rằng phát xạ tự phát là sự phát xạ được kích thích bởi sự thăng giáng quanh điểm 0.

Xem 99 Hiệu ứng Casimir còn đem tới một điều đáng ngạc nhiên khác: giữa 2 bản kim loại, tốc độ ánh sáng thay đổi và có thể lớn hơn c. Bạn có thể mường tượng được ý nghĩa Câu đố 68 s chính xác của từ 'tốc độ ánh sáng' trong ngữ cảnh này hay không?

Năm 2006, hiệu ứng Casimir tiếp tục làm người ta kinh ngạc. Câu chuyện thú vị về tàu thuyền chỉ được đưa ra với mục đích làm cho hiệu ứng dễ hiểu; nhưng câu chuyện này hình như dựa trên một sự hiểu lầm. Than ôi, sự diễn giải của Sipko Boersma về câu Xem 90 chuyện hải hành cổ xưa này hình như chỉ là điều mơ tưởng. Có thể có một hiệu ứng như vậy đối với tàu thuyền nhưng chưa ai thấy hay ghi nhận lại, như Fabrizio Pinto đã chỉ ra khi nghiên cứu kỹ càng các tư liệu về hàng hải. Nhưng nói về sự tương tự thì điều này vẫn còn giá trị.

Dịch chuyển Lamb

Trong quá khứ, việc một người được giải Nobel vật lý nhờ quan sát màu sắc của một ngọn đèn – nếu quan sát thật cẩn thận – là một chuyện thường gặp. Năm 1947, Willis Lamb (b. 1913 Los Angeles, d. 2008 Tucson) đã thực hiện một thí nghiệm như vậy về quang phổ của hydrogen. Ông nhận thấy mức năng lượng $2S_{1/2}$ trong nguyên tử hydrogen nằm cao hơn mức $2P_{1/2}$ một chút. Sự kiện này khác với tính toán đã thực hiện trước đó là hai mức Quyển IV, trang 189 này có cùng năng lượng. Độ sai biệt năng lượng đo được là 1057.864 MHz, hay 4.3 μeV. Khám phá này có các hệ quả quan trọng đối với việc mô tả Thuyết lượng tử và Lamb nhận một phần của giải Nobel vật lý năm 1955. Tại sao?

Lý do có sự khác nhau giữa tính toán và thực nghiệm là do cách tính gần đúng trong khi người ta thực hiện các phép tính tương đối tính các mức năng lượng của hydrogen và phải mất 20 năm để làm sáng tỏ vấn đề này. Có 2 cách giải thích tương đương với nhau. Cách giải thích thứ nhất là trong phép tính tương đối tính người ta đã bỏ qua số hạng liên kết giữa phương trình Dirac và các phương trình Maxwell. Cách giải thích này đưa tới các tính toán đầu tiên của dịch chuyển Lamb vào khoảng năm 1950. Cách thứ hai cho rằng khi tính toán ta đã *bỏ qua các hạt ảo*. Đặc biệt, tính toán đã bỏ qua các photon

ảo được phát xạ và hấp thu trong chuyển động của electron quanh hạt nhân. Cách giải thích 2 phù hợp với ngôn ngữ hiện đại của Điện động lực học lượng tử. Điện động lực học lượng tử hay QED, là cách tiếp cận theo quan điểm (nhiễu loạn) để giải hệ phương trình Dirac Maxwell.

Tóm lại, Lamb đã khám phá hiệu ứng đầu tiên bắt nguồn từ các hạt ảo. Đúng ra ông đã sử dụng vi ba để làm thí nghiệm; chỉ đến năm 1970 người ta mới có thể quan sát dịch chuyển Lamb bằng các phương tiện quang học. Nhờ kỳ công này Arthur Schawlow đã nhận giải Nobel vật lý năm 1981.

Lagrangian QED và các đối xứng của nó

Nói một cách đơn giản, *Điện động lực học lượng tử* là sự mô tả chuyển động của electron. Điều này hàm ý rằng sự mô tả được quy định bởi khối lượng, điện tích và lượng tử tác dụng. Mật độ của Lagrangian QED được cho bởi phương trình:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{QED}} = \; & \overline{\psi}(i\hbar c \not{\partial} - c^2 m_k)\psi && \text{số hạng vật chất} \\ & - \frac{1}{4\mu_0} F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} && \text{số hạng điện từ trường} \\ & + e\hbar c A_\mu \overline{\psi}\gamma^\mu\psi \, . && \text{số hạng tương tác điện từ} \end{aligned} \quad (18)$$

Ta đã biết số hạng vật chất từ phương trình Dirac đối với các hạt tự do; nó mô tả động năng của các electron tự do. Ta cũng biết số hạng điện từ trường từ các phương trình Maxwell; nó mô tả động năng của các photon. Số hạng tương tác là số hạng mã hoá tính đối xứng chuẩn của hiện tượng điện từ, còn được gọi là 'liên kết cực tiểu'; nó mã hoá thế năng. Nói cách khác, Lagrangian mô tả chuyển động của electron và photon.

Mọi thí nghiệm mà người ta đã thực hiện đều phù hợp với sự tiên đoán từ Lagrangian đó. Nói cách khác, nó là mô tả sau cùng và chính xác chuyển động của electron và photon. Đặc biệt, nó mô tả kích thước, hình dạng và màu sắc của các nguyên tử, phân tử, cũng như mọi tương tác của các phân tử. Tóm lại, nó mô tả mọi điều trong Khoa học vật liệu, Hoá học và Sinh học. Nói quá lên một chút, nó mô tả sự sống. (Đúng ra người ta phải thêm vào sự mô tả hạt nhân nguyên tử; ta sẽ tìm hiểu điều này sau đây.)

Trang 162

Mọi hiệu ứng điện từ, bao gồm sự phát triển các đốm màu trên cánh bướm, sự hoạt động của transistor hay việc cắt giấy bằng kéo, đều có thể được mô tả bằng Lagrangian QED. Đúng ra Lagrangian cũng mô tả chuyển động của muon, tau lepton và mọi hạt mang điện khác. Vì Lagrangian là một phần trong việc mô tả sau cùng của chuyển động, nên cũng đáng cho ta tìm hiểu nó kỹ hơn.

Các điều kiện cần để suy ra Lagrangian QED là gì? Danh sách sau đây sẽ cho ta câu trả lời:

— tuân thủ tính lượng tử của tác dụng, bất biến đối với quan sát viên khi xét chuyển động của electron và photon,
— có tính đối xứng đối với nhóm hoán vị nhiều electron, tức là tính fermion của electron,
— tuân thủ tính bất biến của tốc độ ánh sáng, tức là tính đối xứng đối với các phép biến đổi của Thuyết tương đối đặc biệt,
— có tính đối xứng đối với các phép biến đổi chuẩn U(1) khi xét chuyển động của photon

và electron,
— có tính đối xứng đối với nhóm tái chuẩn hoá,
— cường độ tương tác ở mức năng lượng thấp được mô tả bằng *hằng số cấu trúc tinh tế*, hằng số liên kết điện từ, $\alpha \approx 1/137.036$.

Hai điểm sau cùng cần được giải thích một chút. Trong mọi trường hợp chuyển động, tác dụng là tích phân khối theo thời gian của Lagrangian mật độ. Mọi trường, dù là vật chất hay bức xạ, đều chuyển động sao cho tác dụng này nhỏ nhất. Đúng ra không có sự khác biệt giữa tiên đoán của nguyên lý tác dụng cực tiểu dựa trên Lagrangian mật độ QED và thực nghiệm. Dù Lagrangian mật độ đã được biết đến từ năm 1926, người ta phải mất đến 20 năm để biết cách tính toán với nó. Chỉ trong những năm khoảng 1947 thì vấn đề trở nên rõ ràng, nhờ phương pháp *tái chuẩn hoá*, nên Lagrangian mật độ của QED trở thành sự mô tả *sau cùng* của mọi chuyển động của vật chất bắt nguồn từ tương tác điện từ trong không-thời gian phẳng. Lý thuyết đã được Julian Schwinger, Freeman Dyson, Richard Feynman và Tomonaga Shin'ichiro, 4 trong các nhà vật lý thông minh nhất, phát triển một cách độc lập với nhau. *

Lagrangian mật độ QED chứa cường độ của tương tác điện từ dưới dạng hằng số cấu trúc tinh tế $\alpha = e^2/(4\pi\varepsilon_0\hbar c) \approx 1/137.036(1)$. Con số này là một phần của Lagrangian; người ta vẫn chưa giải thích được tại sao nó có giá trị đó cho đến năm 2016. Nó là một câu đố khó nhất trong Vật lý. Nhóm chuẩn U(1) cũng đặc biệt đối với các hiện tượng điện từ. Tất cả các điều kiện khác đều đúng với mọi loại tương tác. Thật vậy, người ta đã tập trung vào việc tìm kiếm Lagrangian của 2 tương tác hạt nhân và sau cùng chỉ thành công khi các điều kiện cần, được làm rõ, như ta sẽ thấy trong phần còn lại của quyển sách này.

Quyển I, trang 434

Lagrangian mật độ kiểm soát mọi tính đối xứng mà ta đã biết trong Vật lý cổ điển. Chuyển động thì liên tục, nó bảo toàn năng–động lượng và moment động lượng, có tính tương đối, có tính đối xứng phải–trái, có tính thuận nghịch tức là tính đối xứng đối với sự đổi dấu của vận tốc và có tính lười, tức là cực tiểu hoá tác dụng. Tóm lại, trong giới hạn do lượng tử tác dụng đặt ra, ta vẫn có thể tiên đoán được các chuyển động bắt nguồn từ QED.

Tương tác và các hạt ảo

Tương tác điện từ là sự trao đổi các photon ảo. Như vậy tương tác trở thành lực hút như thế nào? Thoạt tiên ta tưởng sự trao đổi các photon ảo sẽ đẩy các electron ra xa nhau nhưng điều này không đúng. Động lượng của các photon ảo không phải theo hướng của dòng chảy năng lượng; nó có thể có hướng ngược lại.** Dĩ nhiên điều này chỉ xảy ra trong giới hạn cho phép của hệ thức bất định.

Nhưng các hạt ảo cũng có các tính chất lạ thường: ta không thể đếm được các photon ảo.

* Tomonaga Shin'ichiro (b. 1906 Tokio, d. 1979 Tokio) đã phát triển Điện động lực học lượng tử và nhận giải Nobel vật lý năm 1965 cùng với Feynman và Schwinger. Sau đó ông trở thành nhân vật quan trọng trong các chính sách về khoa học; cùng với bạn đồng môn thời trung học và cũng là người từng đoạt giải Nobel vật lý, Yukawa Hidei, ông là một tấm gương cho các nhà khoa học ở Nhật Bản.

** Một trong những quyển sách nhỏ hay nhất về Điện động lực học lượng tử mà cho đến bây giờ vẫn được sử dụng làm sách giáo khoa là sách của Richard Feynman, *QED: Lý thuyết kỳ lạ về ánh sáng và vật chất*, Penguin Books, 1990.

Năng lượng của chân không: vô hạn hay không có gì?

Kết quả kỳ lạ nhất của Thuyết trường lượng tử là mật độ năng lượng của chân không. Một mặt, với sự gần đúng tốt nhất, chân không không có khối lượng và năng lượng. Năng lượng chân không của chân không phải có số đo bằng *zero* (hay ít ra cũng cực kỳ nhỏ).*

Mặt khác, mật độ năng lượng thăng giáng quanh điểm 0 của điện từ trường được cho bởi công thức

$$\frac{E}{V} = \frac{4\pi h}{c^3} \int_0^\infty \nu^3 \mathrm{d}\nu \,. \qquad (19)$$

Kết quả của tích phân này là vô cùng lớn. Như vậy Thuyết trường lượng tử tiên đoán mật độ năng lượng của chân không là *vô cùng lớn*.

Ta có thể điều chỉnh bài toán theo cách sau đây. Như chúng ta sẽ biết vào lúc cuối cuộc hành trình, có một khoảng cách đo được nhỏ nhất trong thiên nhiên; khoảng cách

Quyển VI, trang 40

này xuất hiện khi ta tính đến lực hấp dẫn. Khoảng cách cực tiểu có độ lớn cỡ *chiều dài Planck*

$$l_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{\hbar G/c^3} \approx 1.6 \cdot 10^{-35}\ \mathrm{m} \,. \qquad (20)$$

Quyển VI, trang 40

Một khoảng cách cực tiểu sẽ dẫn tới một tần số ngưỡng cực đại. Nhưng ngay cả trong trường hợp này mật độ chân không vẫn là một số khổng lồ và lớn hơn trị số đo được trên 100 lần. Nói cách khác, QED tiên đoán một năng lượng chân không khổng lồ khi ta kể đến lực hấp dẫn. Nhưng số đo được lại bé tí. Phép tính đơn giản này sai ở chỗ nào? Bây giờ ta chưa thể trả lời; đến quyển cuối vấn đề này sẽ trở nên rõ ràng.

Gương chuyển động

Gương vẫn hoạt động khi chúng hay nguồn sáng chuyển động. Trái lại, tường hay gương của âm thanh, *không* tạo ra tiếng vang đối với mọi nguồn âm hay mọi tốc độ của bức tường. Thí nghiệm cho ta thấy rằng tường không tạo ra tiếng vang khi nó hay nguồn âm chuyển động nhanh hơn âm thanh. Tường không tạo ra tiếng vang ngay cả khi nguồn âm chuyển động cùng với nó, nếu cả hai chuyển động nhanh hơn âm thanh. Mặt khác, gương ánh sáng *luôn luôn* tạo ra hình ảnh, bất kể tốc độ nguồn sáng hay gương là bao nhiêu. Thí nghiệm chứng tỏ rằng tốc độ ánh sáng đối với mọi quan sát viên đều giống nhau: nó là một *bất biến* và là tốc độ giới hạn. (Bạn có thể trình bày lập luận này cho rõ

Câu đố 69 s

hơn không?) Trái lại, tốc độ âm trong không khí phụ thuộc vào quan sát viên; nó *không phải là* một bất biến.

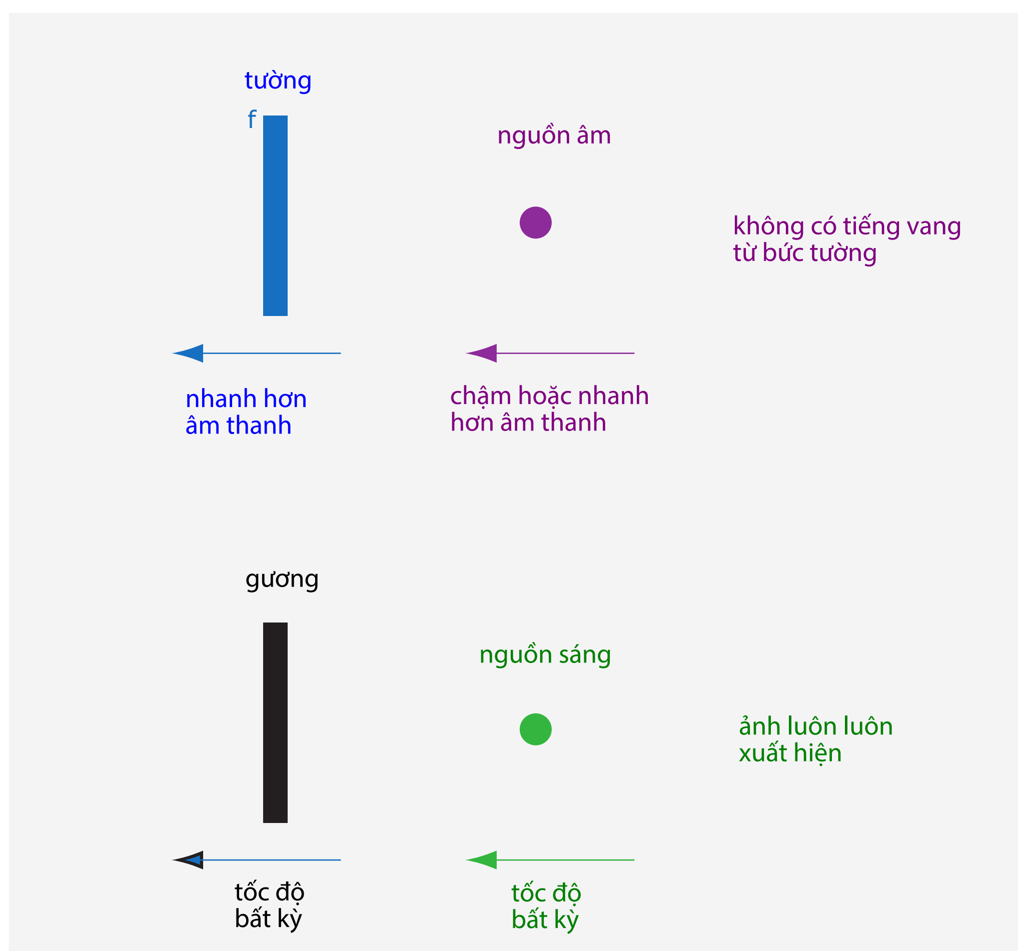
Gương ánh sáng cũng khác vợt tennis (vợt là gương của banh tennis). Ta đã thấy

Quyển II, trang 23

không thể sử dụng gương để làm thay đổi tốc độ ánh sáng mà chúng chạm vào, khác với vợt tennis có thể làm banh thay đổi tốc độ. Nhận xét này cho ta thấy tốc độ ánh sáng là một tốc độ *giới hạn*. Tóm lại, chỉ cần gương và các tính chất của chúng cũng đủ để ta suy ra Thuyết tương đối đặc biệt.

Nhưng còn nhiều điều thú vị hơn mà ta có thể học được từ gương. Ta chỉ còn thắc

* Năm 1998, vấn đề này càng lúc càng rối rắm. Các thí nghiệm vật lý thiên văn thực hiện trong những năm sau đó đã cho ta thấy rằng năng lượng chân không có một giá trị nhỏ nhưng khác 0 cỡ 0.5 $\mathrm{nJ/m^3}$. Người ta vẫn chưa giải thích được điều này và đây vẫn còn là một vấn đề mở của vật lý hiện đại.



HÌNH 80 Một bức tường nhanh không tạo ra tiếng vang; một gương chuyển động nhanh vẫn tạo ra hình ảnh.

mắc là gương có còn hoạt động hay không khi chúng chuyển động có *gia tốc*. Vấn đề này cho ta một kết quả đáng kinh ngạc.

Trong những năm 1970, nhiều nhà khoa học đã độc lập khám phá ra rằng không có chân không đối với các quan sát viên có gia tốc. Hiệu ứng này có tên là *hiệu ứng Fulling–Davies–Unruh*. (Thuật ngữ sai và ít được sử dụng là *hiệu ứng Casimir động lực* đã bị loại bỏ.) Đối với một quan sát viên có gia tốc, chân không đầy các bức xạ nhiệt. Sự kiện này có một hệ quả thú vị đối với các gương có gia tốc: gương chuyển động có gia tốc sẽ phản xạ bức xạ nhiệt mà nó gặp. Tóm lại, *gương có gia tốc sẽ phát ra ánh sáng*! Điều không may là cường độ của *bức xạ Unruh* này yếu đến nỗi cho tới bây giờ ta vẫn chưa đo được nó. (Bạn có thể giải thích tại sao gương có gia tốc lại phát ra ánh sáng mà không phải là vật chất không?)

Trang 146
Câu đố 70 s

Photon chạm photon

Bình thường thì ánh sáng có thể đi xuyên qua ánh sáng mà không gây ra ảnh hưởng gì: hiện tượng giao thoa là bằng chứng và là kết quả của tính chất cơ bản này. Nhưng có một ngoại lệ. Khi ta kể tới các hạt ảo, các chùm ánh sáng có thể 'bang' vào nhau – dù rất nhẹ. Kết quả này hoàn toàn mâu thuẫn với Điện động lực học cổ điển.

Thật vậy, QED chứng tỏ rằng sự xuất hiện của các cặp electron-positron ảo cho phép các photon chạm vào nhau. Và ta có thể tìm được các cặp hạt như vậy trong mọi chùm ánh sáng. Tuy vậy, thiết diện ngang để các photon chạm nhau rất nhỏ. Nói cách khác, sự va chạm rất yếu. Khi hai chùm ánh sáng đi xuyên qua nhau, phần lớn các photon sẽ không bị ảnh hưởng. Thiết diện ngang A gần bằng

$$A \approx \frac{973}{10\,125\pi}\,\alpha^4 \left(\frac{\hbar}{m_e c}\right)^2 \left(\frac{\hbar\omega}{m_e c^2}\right)^6 \qquad (21)$$

trong các trường hợp thông thường thì năng lượng $\hbar\omega$ của photon nhỏ hơn năng lượng nghỉ $m_e c^2$ của electron rất nhiều. Giá trị của năng lượng này nhỏ hơn khoảng 18 lần giá trị đo được trong năm 1999; trong tương lai ta sẽ biết được là có thể quan sát được hiệu ứng này đối với ánh sáng khả kiến hay không. Tuy vậy, đối với các photon năng lượng cao ta đã quan sát được các hiệu ứng này trong các máy gia tốc hạt. Trong các thí nghiệm, ta đã quan sát được sự tương tác thông qua các cặp electron – phản electron ảo cũng như các cặp muon – phản muon ảo, các cặp quark – phản quark ảo, v.v...

Mọi người đọc tiểu thuyết khoa học viễn tưởng đều biết rằng vật chất và phản vật chất huỷ biến và biến đổi thành ánh sáng thuần tuý. Nói chính xác hơn, một hạt vật chất và một hạt phản vật chất huỷ biến thành 2 hay nhiều photon. Điều thú vị là Thuyết lượng tử đã tiên đoán rằng quá trình ngược lại cũng có thể xảy ra: các photon chạm nhau có thể tạo ra vật chất! Năm 1997, tiên đoán này đã được khẳng định bằng thực nghiệm. Xem 100

Tại máy gia tốc hạt Stanford, photon từ các xung laser năng lượng cao đã bật ra khi chạm các electron nhanh. Bằng cách này, các photon bị phản xạ kiếm được nhiều năng lượng, khi được quan sát trong hệ quy chiếu quán tính của phòng thí nghiệm. Xung laser lục có bước sóng 527 nm hay 2.4 eV, mật độ công suất đỉnh 10^{22} W/m^2, lớn nhất tính cho tới nay. Hai giá trị ghi nhận được vào lúc đó: mật độ photon là 10^{34} /m^3 và điện trường là 10^{12} V/m. Khi xung laser lục này bị phản xạ bởi một chùm electron 46.6 GeV, Câu đố 71 e các photon có năng lượng là 29.2 GeV và trở thành tia gamma có năng lượng cao. Các tia gamma này va chạm với các photon lục đang tới và tạo ra các cặp electron–positron theo phản ứng

$$\gamma_{29.2\mathrm{GeV}} + n\,\gamma_{\mathrm{green}} \rightarrow e^+ + e^- \qquad (22)$$

cả hai hạt sau cùng này đều được các dụng cụ đặc biệt phát hiện. Như vậy thí nghiệm đã chứng tỏ rằng trong thiên nhiên ánh sáng có thể va chạm với ánh sáng và quan trọng nhất là sự va chạm đó có thể tạo ra vật chất. Ở đây ta đã đến rất gần với điều kỳ diệu trong tiểu thuyết khoa học viễn tưởng là các gươm laser có thể *chém mạnh* vào nhau.

Chân không có phải là một nguồn nhiệt động lực không?

Nếu chân không là một biển các photon và các cặp hạt–phản hạt ảo, thì ta tự hỏi nó có thể được xem như là một nguồn nhiệt động lực hay không. Nói một cách tổng quát, câu trả lời là không. Thuyết trường lượng tử áp dụng được vì chân không *không phải là* một nguồn nhiệt động lực của các hạt đơn lẻ. Tuy vậy, luôn luôn có ngoại lệ. Đối với các hệ tiêu tán được tạo ra từ nhiều hạt, như các vật dẫn điện tử, chân không *có thể* vận hành như một lưu chất nhớt. Các vật trung hoà, hình dạng không đều nhưng dẫn điện, có thể phát ra các photon khi được gia tốc và sẽ làm tắt dần chuyển động đó. Hiện tượng này bắt nguồn từ hiệu ứng Fulling–Davies–Unruh như đã mô tả ở trên. Sự tắt dần phụ thuộc vào hình dạng và hướng chuyển động của vật.

Xem 101

Năm 1998, Gour và Sriramkumar đã tiên đoán rằng chuyển động Brown cũng sẽ xuất hiện đối với *gương* không hoàn hảo - tức có hấp thu một phần - đặt trong chân không. Sự thăng giáng của chân không sẽ tạo ra một giá trị trung bình của bình phương độ dịch chuyển

Quyển I, trang 391

Xem 102

$$\langle d^2 \rangle = \frac{\hbar}{m} t \tag{23}$$

tăng tuyến tính đối với thời gian; tuy vậy, độ dịch chuyển cực nhỏ được tạo ra bằng cách này cho đến nay vẫn chưa thể đo được. Nhưng kết quả này không làm ta ngạc nhiên. Bạn có thể giải thích điều này một cách đơn giản hơn không?

Câu đố 72 ny

Sự tái chuẩn hoá – tại sao electron lại nhẹ như vậy?

Trong Vật lý cổ điển, người ta đã tiên đoán là năng lượng trường của các điện tích điểm và khối lượng của nó vô cùng lớn. QED đã *làm nhoè* điện tích của electron theo bước sóng Compton; kết quả là năng lượng trường chỉ đóng góp một phần nhỏ vào khối lượng toàn phần. Bạn có thể chứng minh điều này không?

Quyển III, trang 242
Câu đố 73 s

QED là một mô tả *theo quan điểm nhiễu loạn*. Điều này có nghĩa là mọi kết quả tiên đoán R mà ta tìm thấy là một chuỗi luỹ thừa Taylor theo tham số nhỏ α

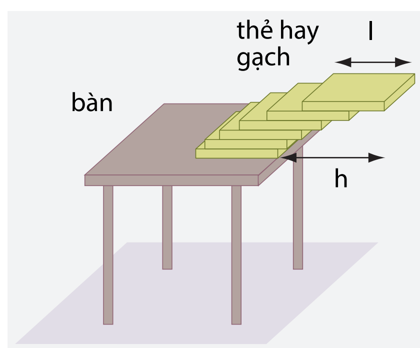
$$R = R_0 + R_1\alpha + R_2\alpha^2 + R_3\alpha^3 + R_4\alpha^4 + ... \tag{24}$$

Trong QED, tham số đó là hằng số cấu trúc tinh tế $\alpha = 1/137.036(1)$. Nhờ chuỗi nhiễu loạn, ta sẽ tiến rất gần với giá trị đúng của R.

Trong QED, nhiều kết quả trung gian trong khai triển nhiễu loạn là các tích phân phân kỳ tức là tích phân dẫn tới vô hạn. Sự phân kỳ này bắt nguồn từ việc ta đã giả sử rằng trong thiên nhiên có các khoảng cách vô cùng nhỏ. Ta có thể khử sự phân kỳ này; phương pháp khử được gọi là sự tái chuẩn hoá.

Đôi khi có người cho rằng giá trị vô cùng lớn xuất hiện trong Điện động lực học lượng tử trong các bước tính toán trung gian chứng tỏ rằng lý thuyết này không đầy đủ hoặc sai. Tuy vậy, cách phát biểu này cũng sẽ dẫn tới việc Vật lý cổ điển không đầy đủ hoặc sai, dựa trên định nghĩa vận tốc v với toạ độ không gian x và thời gian t, cụ thể là

$$v = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \Delta x \frac{1}{\Delta t} , \tag{25}$$



HÌNH 81 Giá trị khả hữu cực đại của h/l là bao nhiêu?

thì ta cũng gặp vô hạn ở các bước trung gian. Thật vậy, dt vô cùng nhỏ, thì có thể cho rằng đã có phép chia cho zero. Cả hai lập luận đều cho thấy thật khó mà chấp nhận rằng kết quả của một quá trình tìm giới hạn có thể là một giá trị hữu hạn mặc dù các giá trị vô hạn chỉ xuất hiện trong khi tính toán. Sự song hành giữa khối lượng và vận tốc của electron thì gần hơn ta tưởng; cả hai 'vô hạn' trung gian đều phát sinh từ giả định không-thời gian thì liên tục, tức là có thể phân chia vô hạn. Sự cần thiết của vô hạn trong các quá trình tìm giới hạn đối với định nghĩa của vi phân, tích phân hay sự tái chuẩn hoá chỉ xuất hiện khi không-thời gian được tính toán gần đúng, như các nhà vật lý nói, là một tập hợp 'liên tục' hay như các nhà toán học nói, là một tập hợp 'đầy đủ'.

Mặt khác, việc tin rằng sự xuất hiện của vô hạn có thể là một dấu hiệu của tính không đầy đủ của một lý thuyết là một sự phát triển thú vị trong vật lý. Nó cho thấy các nhà vật lý đã cảm thấy không thoải mái khi sử dụng vô hạn trong việc mô tả thiên nhiên. Điều đáng chú ý đây chính là trường hợp của Paul Dirac, người mà sau khi đã dành tuổi trẻ của mình cho việc đặt nền tảng cho Điện động lực học lượng tử, đã thử dùng phần đời còn lại để tìm ra một cách, mà không thành công, để thay đổi lý thuyết sao cho người ta tránh được các vô hạn trung gian.

Xem 103

Sự tái chuẩn hoá là một phương pháp phát sinh từ yêu cầu không-thời gian liên tục và các lý thuyết chuẩn có thể đi chung với nhau. Đặc biệt, sự tái chuẩn hoá dẫn tới yêu cầu khái niệm hạt phải nhất quán, tức là cho phép các khai triển nhiễu loạn. Các vô hạn trung gian không còn là vấn để nữa. Một vài thập niên sau khi Dirac qua đời, nhờ một cải tiến kỳ quái nên sau cùng ước nguyện của ông đã thành mặc dù khác với những gì ông đã phác hoạ. Phần sau cùng của hành trình lên đỉnh sẽ trình bày cách giải quyết vấn đề này.

Quyển VI, trang 37

Các câu đố vui và lạ về Điện động lực học lượng tử

Chuyển động là một đề tài thú vị và khi có một người tò mò hỏi về nó thì trong đa số các trường hợp người ta cần đến Điện động lực học lượng tử để trả lời. Cùng với lực hấp dẫn, Điện động lực học lượng tử giải thích hầu hết các kinh nghiệm thông thường của chúng ta, kèm theo nhiều điều đáng kinh ngạc.

* *

Một câu đố nổi tiếng được minh hoạ trong Hình 81, hỏi khoảng cách nhô ra khỏi cạnh bàn của tấm thẻ sau cùng (hay viên gạch sau cùng) của chồng thẻ là bao nhiêu. Dĩ nhiên

ở đây chỉ có trọng lực, không có keo dán hay các phương tiện khác giữ thẻ trên bàn. Sau khi bạn giải xong câu đố, bạn có thể cho lời giải trong trường hợp có tính đến lượng tử tác dụng không?

Câu đố 74 s

* *

Điện động lực học lượng tử giải thích lý do tại sao chỉ có một số *hữu hạn* các loại nguyên tử khác nhau. Đúng ra ta chỉ cần 2 hàng để chứng minh rằng sự sinh cặp electron– phản electron làm cho hạt nhân không thể có hơn 137 proton. Bạn có thể chứng minh điều này không? Tóm lại, hằng số cấu trúc tinh tế giới hạn số nguyên tố hoá học trong thiên nhiên. Hiệu ứng làm nền tảng cho giới hạn này,sự phân cực của chân không, cũng có vai trò quan trọng trong các hệ lớn hơn, các hố đen có tích điện, như ta sẽ thấy sau này.

Xem 104
Câu đố 75 s
Trang 153

* *

Việc lấy 91 trong 92 electron ra khỏi nguyên tử uranium cho phép các nhà nghiên cứu kiểm tra với độ chính xác cao việc electron trong cùng có thể được mô tả bằng QED hay không. Điện trường gần hạt nhân uranium, 1 EV/m, là giá trị lớn nhất mà ta đạt được trong phòng thí nghiệm; giá trị này gần với ngưỡng của sự sinh cặp tự phát. Đây là trường không đổi lớn nhất mà ta có thể tạo ra trong phòng thí nghiệm và là một nơi thử nghiệm lý tưởng về độ chính xác của các thí nghiệm của QED. Tác dụng của các photon ảo là tạo ra dịch chuyển Lamb; nhưng dù các trường cực mạnh, giá trị đo được vẫn khớp với giá trị tính toán.

Xem 105

* *

Có một *từ trường tới hạn* trong thiên nhiên, giống như điện trường tới hạn, bị giới hạn bởi sự sinh cặp tự phát không?

Câu đố 76 ny

* *

Sự tiến hoá vi mô có thể rất chậm. Ánh sáng, đặc biệt là khi được một nguyên tử đơn lẻ phát ra, luôn luôn được phát xạ ở trạng thái nửa bền. Thời gian phân rã do các thăng giáng của chân không sinh ra thường ngắn hơn 1 microsecond. Tuy vậy, vẫn có các trạng thái nguyên tử nửa bền với thời gian sống là 10 năm: thí dụ như một ion ytterbium ở trạng thái $^2F_{7/2}$ có giá trị này vì sự phát xạ ánh sáng cần một sự chuyển mức bát cực, trong đó moment động lượng thay đổi $3\hbar$; đây là một quá trình cực hiếm.

Trong hiện tượng phóng xạ, kỷ lục về sự chậm chạp do ^{209}Bi nắm giữ, với chu kỳ bán rã là trên 10^{19} năm.

Xem 106
Trang 342

* *

Sự tiến hoá vi mô có thể rất nhanh. Bạn có thể hình dung ra cách suy diễn hay phép đo tốc độ các electron trong nguyên tử không? Và bên trong kim loại?

Câu đố 77 s

* *

Nếu một dây điện đủ hẹp, độ dẫn điện của nó được lượng tử hoá thành nhiều bậc của $2e^2/\hbar$. Dây càng to độ dẫn càng có nhiều bậc. Bạn có thể giải thích hiệu ứng này không? Cũng cần nói thêm người ta đã quan sát được độ dẫn lượng tử hoá đối với ánh sáng và phonon.

Câu đố 78 s
Xem 109

* *

Hiệu ứng Casimir cũng như các thí nghiệm khác hàm ý rằng có một mật độ năng lượng đặc biệt và *hữu hạn* có thể gán cho chân không. Có phải điều này có nghĩa là ta có thể áp dụng hiệu ứng Banach–Tarski cho các mảnh chân không hay không? Câu đố 79 d

* *

Câu đố 80 s Bạn có thể giải thích lý do tại sao bùn lại đục không?

* *

Tính không ổn định của chân không cũng tạo ra một giới hạn (không đáng kể) trên hằng số cấu trúc tinh tế. Giá trị của hằng số cấu trúc tinh tế vào khoảng 1/137.036 không thể giải thích được bằng Điện động lực học lượng tử. Tuy vậy, ta có thể suy ra một điều là nó phải nhỏ hơn 1 để lý thuyết được nhất quán. Thật vậy, nếu giá trị của nó lớn hơn 1, chân không sẽ không ổn định và sẽ tự phát sinh ra các cặp electron-positron. Xem 201

* *

Câu đố 81 s Có khi nào vũ trụ nhỏ hơn bước sóng Compton của chính nó không?

* *

Trong quá khứ, việc mô tả chuyển động bằng các công thức được coi trọng hơn. Trước khi máy tính ra đời, người ta chỉ nghiên cứu các chuyển động có thể được mô tả bằng các công thức đơn giản. Nhưng cách tiếp cận hạn hẹp này hoá ra quá gò bó. Thật vậy, các toán gia đã chứng minh rằng cơ học Galilei không thể giải được bài toán 3 vật, Thuyết tương đối đặc biệt không thể giải được bài toán 2 vật, Thuyết tương đối tổng quát thì bài toán 1 vật và Thuyết trường lượng tử là bài toán 0 vật. Phải mất khá nhiều thời gian để cộng đồng các vật lý gia thấy rằng việc tìm hiểu chuyển động không phụ thuộc vào việc mô tả bằng công thức mà phụ thuộc vào việc mô tả bằng các phương trình rõ ràng dựa trên không gian và thời gian.

* *

Đúng ra thì Điện động lực học lượng tử, hay QED, cung cấp cho ta rất nhiều điều kỳ lạ và mỗi năm đều có ít nhất một khám phá mới đầy thú vị. Ta kết thúc chủ đề này bằng một cách tiếp cận tổng quát hơn.

Làm thế nào để người ta có thể di chuyển trên mặt băng hoàn hảo? – Bài kiểm tra vật lý cuối cùng

Trong cuộc hành trình, ta đã gặp nhiều loại chuyển động. Do đó, bài kiểm tra sau đây – đừng xem trọng quá – là bài kiểm tra vật lý sau cùng, cho phép bạn kiểm tra lại sự hiểu biết của mình và so sánh kết quả của bạn với kết quả của người khác.

Hãy tưởng tượng rằng bạn đang ở trên một mặt nhẵn bóng không ma sát và bạn muốn di chuyển tới đường biên của nó. Bạn tìm được bao nhiêu cách để làm việc này? Bạn được dùng bất cứ phương pháp nào kể cả khi hiệu quả của nó rất ít.

Vật lý cổ điển cung cấp khá nhiều phương pháp. Ta đã biết rằng để tự quay tròn thì chỉ cần đưa tay lên đầu. Để chuyển động tĩnh tiến, chỉ cần ném đi một chiếc giày hay hít vào theo phương thẳng đứng và thở ra theo phương nằm ngang là các khả năng đơn

giản nhất. Bạn có thể liệt kê thêm ít nhất 6 phương pháp nữa và có lẽ một số sẽ sử dụng
Câu đố 82 s vị trí trên mặt Trái đất? Nếu trong không gian thì bạn sẽ làm gì?

Điện động lực học và Nhiệt động lực học đã cho ta biết rằng trong chân không việc đốt nóng một bên của một vật thể nhiều hơn bên kia sẽ tạo ra một động cơ; sự mất cân bằng của bức xạ nhiệt sẽ đẩy bạn mặc dù có chậm hơn. Bạn có thể tìm ra ít nhất 4 phương
Câu đố 83 s pháp khác trong 2 lĩnh vực này không?

Thuyết tương đối tổng quát đã chứng minh rằng việc quay một cánh tay sẽ phát ra sóng hấp dẫn không đối xứng và sẽ kéo theo sự chuyển động. Bạn có thể tìm ra ít nhất
Câu đố 84 s 2 phương pháp khác tốt hơn không?

Thuyết lượng tử cũng cho ta nhiều phương pháp. Dĩ nhiên là cơ học lượng tử cũng đã cho thấy rằng chúng ta luôn chuyển động vì hệ thức bất định đã ngăn việc đứng yên. Tuy vậy, chuyển động trung bình có thể là 0 mặc dù sự trải rộng của hàm sóng tăng theo thời gian. Bạn có thể tìm ra ít nhất 4 phương pháp chuyển động trên mặt băng bắt nguồn từ
Câu đố 85 s các hiệu ứng lượng tử không?

Khoa học vật liệu, Địa vật lý, Vật lý khí quyển và Vật lý thiên văn cũng cho ta các phương thức di chuyển như các tia vũ trụ hay neutrino của Mặt trời. Bạn có thể tìm ra
Câu đố 86 s thêm 4 phương pháp nữa không?

Sự tự tổ chức, Thuyết hỗn độn và Sinh vật lý cũng cho ta nhiều cách chuyển động, khi ta tính đến các hoạt động bên trong cơ thể. Bạn có thể tìm ra ít nhất 2 phương pháp
Câu đố 87 s không?

Giả sử bạn đã đọc phần sau phần này, về các hiệu ứng *hấp dẫn lượng tử* bán cổ điển, thì đây là một câu đố phụ: có thể chuyển động bằng cách gia tốc một gương bỏ túi sử
Câu đố 88 s dụng bức xạ Unruh hay không? Bạn có thể tìm ra thêm 2 phương pháp khác để chuyển động nhờ các hiệu ứng hấp dẫn lượng tử hay không? Bạn có thể tìm 1 phương pháp xuất phát từ Lý thuyết dây hay không?

Nếu bạn muốn tính điểm bài kiểm tra thì việc cho điểm rất đơn giản. Đối với học sinh mỗi phương pháp hoạt động được 1 điểm. Tám điểm là ok, 12 điểm là tốt, 16 điểm là rất tốt, và từ 20 điểm trở lên là giỏi. Đối với vật lý gia, chỉ được tính điểm khi các ước tính thô cung cấp được động lượng và gia tốc.

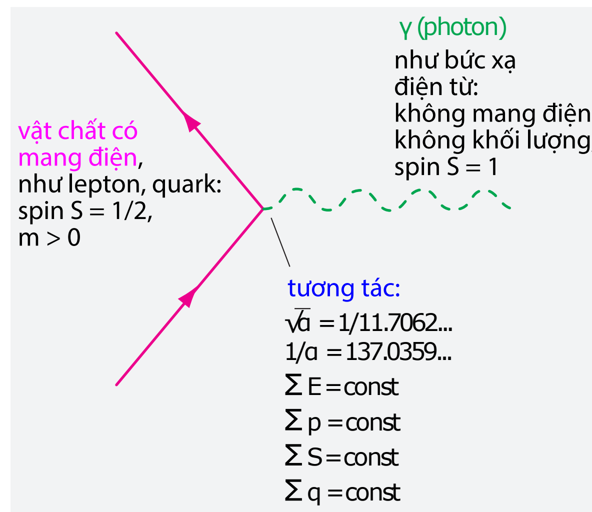
Tóm tắt về Điện động lực học lượng tử

Một tóm lược ngắn nhất của Điện động lực học lượng tử:

▷ Vật chất thông thường được tạo thành từ các hạt sơ cấp mang điện tương tác với nhau thông qua sự trao đổi photon theo phương thức được mô tả trong Hình 82.

Không cần thông tin bổ sung. Chi tiết hơn một chút, Điện động lực học lượng tử khởi đầu với *các hạt sơ cấp* – được đặc trưng bằng khối lượng, spin, điện tích và tính chẵn lẻ – và với *chân không*, chủ yếu là một biển các cặp hạt–phản hạt ảo. *Sự tương tác* giữa các hạt mang điện được mô tả như sự trao đổi các photon ảo và *sự phân rã* điện từ được mô tả như sự tương tác với các photon ảo của chân không.

▷ Giản đồ Feynman trong Hình 82 cho ta một mô tả *chính xác* của *mọi* hiện tượng và quá trình điện từ.



HÌNH 82 Nền tảng của QED; nói chính xác hơn, lược đồ cơ bản của QED là một lý thuyết nhiễu loạn trong không-thời gian.

Người ta chưa thấy có điều gì mâu thuẫn giữa thực nghiệm và tính toán. Đặc biệt, giản đồ Feynman tương đương với Lagrangian QED của phương trình (18). Vì QED là một thuyết theo quan điểm nhiễu loạn, giản đồ Feynman mô tả trực tiếp các hiệu ứng bậc nhất; giản đồ phức hợp sẽ mô tả các hiệu ứng có bậc cao hơn. Trang 126

QED mô tả mọi tính chất thông thường của vật chất và bức xạ. Nó mô tả *tính khả phân* cho tới các hợp phần nhỏ nhất, *tính khả cô lập* đối với môi trường và *tính bất khả xuyên thấu* của vật chất. Nó cũng mô tả *tính xuyên qua được* của bức xạ. Tất cả các tính chất này bắt nguồn từ các tương tác điện từ của các hợp phần được biểu diễn trong Hình 82. Vật chất có tính khả phân vì các tương tác có cường độ hữu hạn và cũng vì chúng có tầm tác dụng hữu hạn. Vật chất có tính bất khả xuyên thấu vì tương tác giữa các hợp phần mạnh lên khi chúng đến gần nhau, đặc biệt vì chúng là các fermion. Bức xạ có thể phân chia thành các photon xuyên qua nhau được vì photon là boson và không có các tương tác photon-photon bậc nhất.

Cả vật chất và bức xạ đều được tạo thành từ các hợp phần *sơ cấp*. Các hợp phần sơ cấp này, dù là boson hay fermion, đều không thể phân chia, có thể cô lập được, không thể phân biệt được và là các chất điểm.

Ta phải sử dụng Điện động lực học lượng tử trong mọi trường hợp mà kích thước đặc trưng d có cỡ của bước sóng Compton tức là

$$d \approx \lambda_C = \frac{h}{m\,c} \,. \tag{26}$$

Trong các trường hợp mà kích thước có cỡ của bước sóng de Broglie hay tương đương tức tác dụng có cỡ của hằng số Planck thì chỉ cần sử dụng Cơ học lượng tử đơn giản là đủ:

$$d \approx \lambda_{dB} = \frac{h}{m\,v} \,. \tag{27}$$

Đối với kích thước lớn hơn, ta sử dụng Vật lý cổ điển.

Cùng với lực hấp dẫn, Điện động lực học lượng tử giải thích được hầu hết các hiện tượng về chuyển động trên Trái đất; QED thống nhất sự mô tả vật chất và bức xạ điện từ trong đời sống hằng ngày. Người ta có thể mô tả mọi vật thể thông thường, mọi hình ảnh, kể cả các tính chất, hình dạng, các biến đổi của chúng cùng các thay đổi khác. Điều này tính luôn các trường hợp tự tổ chức và các quá trình hoá sinh. Nói cách khác, QED đã cho chúng ta nắm vững các hiệu ứng và sự đa dạng của chuyển động bắt nguồn từ các hiện tượng điện từ.

Những câu hỏi mở trong QED

Mặc dù QED mô tả chuyển động bắt nguồn từ hiện tượng điện từ nhất quán với các thí nghiệm, thì điều đó cũng không có nghĩa là chúng ta hiểu rõ được mọi chuyển động. Thí dụ như chưa có ai mô tả được chuyển động của một con vật bằng QED.* Đúng ra có các công trình nghiên cứu đẹp và hấp dẫn trong nhiều nhánh của Điện từ học.

Vật lý khí quyển vẫn thường xuyên đặt ra nhiều vấn đề và đều đặn cho ra nhiều hiện
Xem 111 tượng mới lạ mà trước kia chưa ai biết. Cơ chế thật sự về nguồn gốc của cực quang vẫn còn gây tranh luận; và những khám phá gần đây của hiện tượng phóng điện khó hiểu
Xem 112 *trên* các đám mây sẽ không làm cho người ta quên rằng ngay cả cơ chế chính xác của việc phân tách các điện tích *bên trong* các đám mây dẫn tới hiện tượng sét cũng chưa được làm rõ hoàn toàn. Đúng ra mọi thí dụ về sự nhiễm điện, như sự tích điện của hổ phách khi được cọ xát, thí nghiệm tạo ra danh từ "điện", vẫn chưa được hiểu rõ.

Khoa học vật liệu với phạm vi rộng lớn, bao gồm cả việc nghiên cứu chất rắn, lưu chất, plasma cũng như Sinh học và Y học, vẫn còn cung cấp nhiều đề tài nghiên cứu. Đặc biệt, thế kỷ 21 chắc chắn sẽ là thế kỷ của khoa học đời sống.

Việc nghiên cứu sự tương tác của các nguyên tử với ánh sáng có cường độ lớn là một thí dụ về các nghiên cứu đang diễn ra trong Vật lý nguyên tử. Các laser công suất lớn có thể lấy đi nhiều electron của các nguyên tử; những hiện tượng như vậy chưa được mô tả chính xác vì chúng không tuân theo sự gần đúng của trường yếu thường được giả sử trong các thí nghiệm vật lý. Trong các trường mạnh, có các hiệu ứng mới xảy ra như sự
Xem 113 bùng nổ Coulomb.

Nhưng bầu trời cũng có những bí mật của nó. Trong chủ đề tia vũ trụ, người ta vẫn
Xem 114 chưa rõ cách thức mà các tia có năng lượng 10^{22} eV đã được tạo ra bên ngoài thiên hà. Các nhà nghiên cứu đang nỗ lực xác định các trường điện từ cần để gia tốc chúng và để tìm hiểu nguồn gốc cùng cơ chế hoạt động của chúng.

Trong lý thuyết của Điện động lực học lượng tử những nhà nghiên cứu lâu năm đều
Xem 115 mong chờ các khám phá mới. Thí dụ như, Dirk Kreimer đã khám phá ra các giản đồ tương tác bậc cao được xây dựng từ các giản đồ cơ bản trong Hình 82 có chứa các mối liên hệ với Lý thuyết gút. Đề tài nghiên cứu này sẽ cung cấp nhiều kết quả thú vị hơn trong những ngày sắp tới. Mối liên hệ với Lý thuyết gút nảy sinh vì QED là một mô tả *theo quan điểm nhiễu loạn* và vẫn còn che giấu rất nhiều hiệu ứng không nhiễu loạn khác. Việc nghiên cứu QED ở mức năng lượng cao, khi các nhiễu loạn *không còn là* một gần đúng hiệu quả và số hạt không còn bảo toàn, sẽ mở ra một kho tàng các nhận thức mới.

* Mặt khác, ngoài QED, còn có các công trình đẹp đẽ khác tiếp tục nghiên cứu cách con người cử động các chi; hình như bất kỳ một chuyển động tổng quát nào của con người cũng đều được tạo nên trong não bộ
Xem 110 bằng cách tổ hợp một số ít các chuyển động cơ bản.



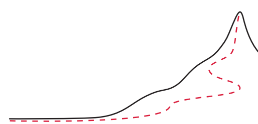
HÌNH 83 Cầu vồng chỉ có thể được giải thích một cách đầy đủ nếu ta có thể tính được hằng số cấu trúc tinh tế α. (© ed g2s, Christophe Afonso).

Để lý luận được chặt chẽ hơn cũng cần thêm vào một điều là ta hoàn toàn *không* hiểu tí gì về màu sắc, vì ta vẫn chưa biết rõ về hằng số cấu trúc tinh tế. Đặc biệt, hằng số này Xem 116 xác định chiết suất của nước, và như vậy liên quan đến việc tạo ra cầu vồng, như trong Hình 83.

Nhiều vấn đề mở khác, thực tế hơn, vẫn chưa được đề cập đến. Thật vậy, cho tới nay phần đông các vật lý gia được cấp ngân sách để nghiên cứu về các dạng QED ứng dụng.

Tuy vậy trong cuộc phiêu lưu, mục tiêu tìm kiếm của chúng ta là sự mô tả *những điều cơ bản* của chuyển động. Cho tới bây giờ ta vẫn chưa đạt được mục đích. Đặc biệt, ta vẫn cần tìm hiểu chuyển động trong vương quốc hạt nhân nguyên tử và ảnh hưởng của lượng tử tác dụng trong lĩnh vực hấp dẫn. Chúng ta hãy bắt đầu với chủ đề sau.





Chương 4

Cơ học lượng tử với lực hấp dẫn – những bước đầu tiên

Lực hấp dẫn là một lực yếu. Thật vậy, mọi thuỷ thủ đều biết rằng bão chứ không phải trọng lực gây ra những tai hoạ tồi tệ nhất. Dù yếu, việc gộp lực hấp dẫn vào Thuyết lượng tử sẽ làm phát sinh nhiều vấn đề. Ta phải giải quyết tất cả để có thể hoàn tất cuộc hành trình lên đỉnh.

Lực hấp dẫn tác dụng lên các hệ lượng tử: trong chương về Thuyết tương đối tổng quát ta đã biết rằng tần số ánh sáng thay đổi theo độ cao. Như vậy lực hấp dẫn có tác dụng lên các photon và có thể đo được. Nhưng lực hấp dẫn cũng tác dụng lên tất cả các hệ lượng tử khác, như nguyên tử và neutron, như ta sẽ thấy sau đây. Và lượng tử tác dụng đóng một vai trò quan trọng trong hành trạng của hố đen.

Các nguyên tử rơi

Sau cùng thì người ta đã có thể lặp lại thí nghiệm trên tháp nghiêng của Galilei vào năm 2004 nhưng bằng nguyên tử thay vì các viên bi thép. Đây không phải là một thí nghiệm dễ thực hiện vì ngay cả một tác động nhỏ nhất cũng làm xáo trộn chuyển động. Kết quả

Xem 117

như người ta mong đợi: các nguyên tử đơn lẻ đã rơi như các hòn đá. Đặc biệt, các nguyên tử có khối lượng khác nhau đều rơi với cùng gia tốc, với độ chính xác của thí nghiệm là 1/6000000.

Thí nghiệm này khó thực hiện nhưng kết quả thì lại bình thường vì mọi vật rơi thông thường đều được tạo thành từ các nguyên tử. Thật vậy, chính Galilei đã tiên đoán rằng các nguyên tử cũng rơi như các hòn đá vì các phần của một vật phải rơi với cùng một

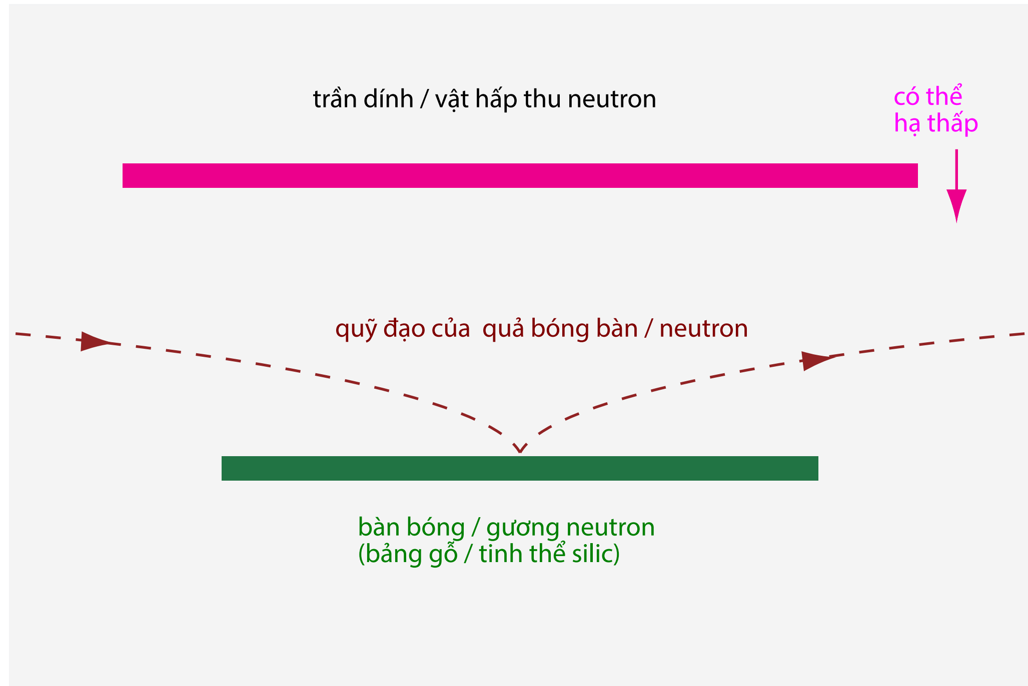
Quyển I, trang 202

gia tốc như toàn bộ vật đó. Nhưng tác dụng chính xác của lực hấp dẫn lên các hàm sóng là gì? Câu hỏi này đã được tìm hiểu đầy đủ nhờ neutron.

Chơi bóng bàn bằng neutron

Thế hấp dẫn cũng có tác dụng trực tiếp lên các hạt lượng tử và ta có thể đo được. Theo Vật lý cổ điển, một quả bóng bàn đi theo một quỹ đạo parabol khi nảy trên bàn bóng, miễn là ma sát không đáng kể. Cách bố trí tổng quát của thí nghiệm được trình bày trong Hình 84. Một hạt lượng tử sẽ hành xử như thế nào trong cách bố trí như vậy?

Trong trường hấp dẫn, một hạt lượng tử nảy lên vẫn có thể được mô tả bằng một hàm sóng. Tuy vậy khác với trường hợp cổ điển, các giá trị năng lượng khả hữu của một hạt lượng tử rơi là các giá trị rời rạc. Thật vậy, sự lượng tử hoá của tác dụng sẽ dẫn tới việc



HÌNH 84 Môn bóng bàn và neutron.

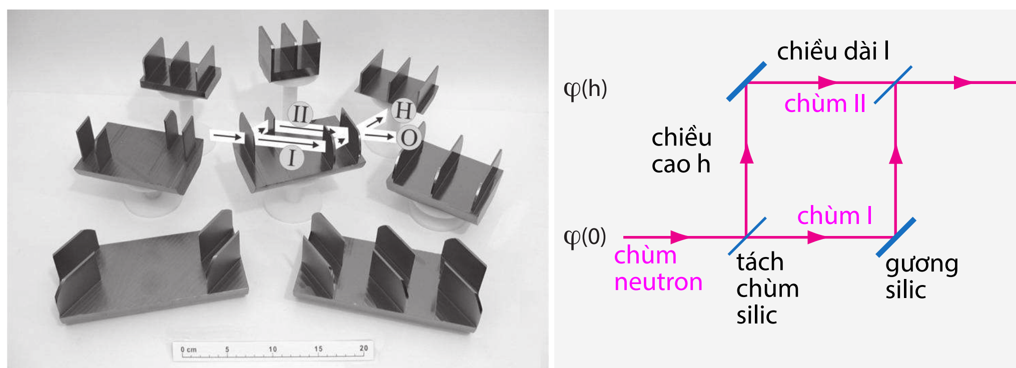
Câu đố 89 e đối với một năng lượng nảy E_n và thời gian nảy t_n, thì

$$n\hbar \sim E_n t_n \sim \frac{E_n^{3/2}}{g m^{1/2}} . \tag{28}$$

Nói cách khác, trong trường hợp lượng tử, các độ cao nảy lên chỉ có thể có trị rời rạc phân biệt với nhau bằng số n. Sự rời rạc dẫn đến mật độ xác suất thay đổi theo độ cao với các bước rời rạc như ta thấy trong Hình 84.

Cách tốt nhất để thực hiện thí nghiệm này với các hạt lượng tử là tạo ra một chùm nhiều hạt trung hoà vì các hạt trung hoà không bị các trường điện từ rải rác trong các phòng thí nghiệm làm ảnh hưởng. Neutron thì lý tưởng, vì ta có thể tạo ra một lượng lớn từ các lò phản ứng hạt nhân. Thí nghiệm này đã được thực hiện lần đầu tiên năm Xem 118 2002, do Hartmut Abele và cộng sự, sau nhiều năm chuẩn bị. Bằng nhiều thủ thuật thông minh, họ đã làm chậm neutron từ một lò phản ứng hạt nhân xuống tới vận tốc nhỏ đến mức khó tin là 8 m/s, tương đương với tốc độ một quả bóng bàn. (Nhiệt độ tương ứng của neutron cực lạnh này là 1 mK, hay 100 neV.) Họ hướng các neutron này lên một gương neutron làm bằng thuỷ tinh mài nhẵn, tương tự bàn bóng bàn và quan sát các neutron nảy lên. Để phát hiện sự nảy lên, họ đã hạ thấp một tấm hấp thu (tương đương với một trần dính) hướng về bàn banh tức gương neutron và đo số neutron đi ra cạnh kia của bàn. (Tấm hấp thu và gương có chiều dài khoảng 20 cm.)

Tại sao phải mất nhiều năm chuẩn bị cho thí nghiệm này? Các mức năng lượng thấp nhất đối với neutron bắt nguồn từ lực hấp dẫn là $2.3 \cdot 10^{-31}$ J, hay 1.4 peV, tiếp theo là



HÌNH 85 Cường độ yếu của lực hấp dẫn. Một giao thoa kế neutron làm bằng một đơn tinh thể silic (với 2 chùm neutron I và II) được sử dụng để phát hiện tác dụng của lực hấp dẫn trên phase của các hàm sóng (photo © Helmut Rauch và Erwin Seidl).

2.5 peV,3.3 peV, 4.1 peV, v.v... Để có ấn tượng về độ nhỏ của các giá trị này, ta có thể so nó với giá trị $2.2 \cdot 10^{-18}$ J hay 13.6 eV là trạng thái thấp nhất trong nguyên tử hydrogen. Mặc dù các giá trị năng lượng này nhỏ, nhóm làm thí nghiệm vẫn đo được vài mức năng lượng rời rạc đầu tiên. Các kết quả này khẳng định sự tiên đoán của phương trình Schrödinger gồm cả thế hấp dẫn, với độ chính xác đạt được của phép đo.

Tóm lại, lực hấp dẫn ảnh hưởng đến các hàm sóng. Đặc biệt, lực hấp dẫn làm đổi phase của các hàm sóng đúng như ta tiên đoán.

Sự thay đổi phase của các hàm sóng do lực hấp dẫn

Lực hấp dẫn không chỉ thay đổi dạng của các hàm sóng; nó còn làm cho *phase* của chúng thay đổi. Bạn có thể hình dung được vấn đề không? Tiên đoán này đã được khẳng định lần đầu tiên vào năm 1975 nhờ sử dụng một thiết bị do Helmut Rauch và cộng sự phát minh. Rauch đã phát triển các giao thoa kế neutron dựa trên các đơn tinh thể silic như ta thấy trong Hình 85, một chùm neutron – từ một lò phản ứng hạt nhân – được tách thành 2 chùm rồi sau đó được kết hợp với nhau để cho hiện tượng giao thoa.

Câu đố 90 s

Xem 119

Bằng cách quay giao thoa kế quanh một trục nằm ngang, Samuel Werner và cộng sự đã để cho 2 chùm neutron giao thoa với nhau sau khi đã leo lên một độ cao h ở 2 vị trí khác nhau. Hình bên phải của Hình 85 là sơ đồ thí nghiệm. Chùm neutron được tách ra; 2 chùm được làm lệch lên trên, 1 trực tiếp, 1 sau đó vài cm, rồi kết hợp với nhau.

Xem 120

Đối với một thí nghiệm trong trọng trường như vậy, Thuyết lượng tử tiên đoán sẽ có một độ lệch phase $\Delta\varphi$ giữa 2 chùm là

Câu đố 91 ny

$$\Delta\varphi = \frac{mghl}{\hbar v} , \tag{29}$$

trong đó l là khoảng cách giữa 2 nơi leo lên, v và m là tốc độ và khối lượng của neutron. Mọi thí nghiệm – cùng với nhiều thí nghiệm khác cũng đơn giản thanh lịch như vậy – đã khẳng định tiên đoán của Thuyết lượng tử trong phạm vi sai số của thí nghiệm.

Trong thập niên 1990, các thí nghiệm tương tự với các nguyên tử đầy đủ đã được thực hiện. Các giao thoa kế nguyên tử này nhạy đến nỗi người ta có thể đo được gia tốc trọng

Xem 121

lực địa phương g với độ chính xác nhiều hơn 8 chữ số.

Tóm lại, neutron, nguyên tử và photon không cho thấy điều gì khác thường trong trường hấp dẫn. Ta có thể tính luôn lực hấp dẫn vào mọi hệ lượng tử trong đời sống hằng ngày. Bằng cách bao gồm lực hấp dẫn trong thế, ta có thể sử dụng các phương trình Schrödinger và Dirac để mô tả sự tăng trưởng và các quá trình xảy ra trong thực vật. Ta có thể mô tả cây cỏ bằng Điện động lực học lượng tử trong trường hấp dẫn yếu.

Nguyên tử Bohr trong trường hấp dẫn

Lực hấp dẫn có dẫn tới các hệ lượng tử *liên kết* không? Một phép tính nhỏ cho ta thấy rằng nếu một electron chuyển động quanh một proton chỉ do lực hấp dẫn mà không có lực hút tĩnh điện thì bán kính Bohr do hấp dẫn sẽ là

$$r_{\text{gr.B.}} = \frac{\hbar^2}{G m_e^2 m_p} = 1.1 \cdot 10^{29}\ \text{m} \qquad (30)$$

tức là bằng hàng ngàn lần khoảng cách tới chân trời vũ trụ. Một nguyên tử Bohr trong trường hấp dẫn sẽ lớn hơn vũ trụ này. Kích thước kinh khủng này là lý do trong một nguyên tử hydrogen bình thường không có một *cách đơn giản* để đo tác dụng hấp dẫn giữa các thành phần của nó. (Bạn có thể chứng minh điều này không?) Câu đố 92 e

Nhưng tại sao lực hấp dẫn lại yếu đến như vậy? Hay phát biểu một cách tương đương, tại sao vũ trụ và các nguyên tử thông thường lại nhỏ hơn một nguyên tử Bohr trong trường hấp dẫn nhiều đến như vậy? Lúc này ta chưa trả lời được câu hỏi này. Tệ hơn nữa, cường độ yếu của lực hấp dẫn còn có nghĩa là các thí nghiệm trong tương lai, với một xác suất lớn, sẽ cho ta rất ít dữ liệu bổ sung để giúp ta chọn lựa giữa các câu trả lời cạnh tranh với nhau. Trợ giúp duy nhất là sự suy nghĩ thấu đáo.

Từ các điều trên ta có thể kết luận là lực hấp dẫn không cần một sự mô tả lượng tử. Thật vậy, ta vấp phải các hiệu ứng lượng tử vì Điện động lực học cổ điển, mâu thuẫn với thực tại, cho ta kết quả là nguyên tử phân rã trong khoảng 0.1 ns. Theo Vật lý cổ điển, một electron chuyển động quanh hạt nhân sẽ phát ra các bức xạ cho tới khi nó rơi vào hạt nhân. Ta cần Thuyết lượng tử để giải thích sự tồn tại của vật chất.

Khi các tính toán liên quan đến sự tồn tại đối với sự phát xạ sóng hấp dẫn do chuyển động quanh hạt nhân của electron, người ta tìm được thời gian phân rã khoảng 10^{37} s. Câu đố 93 ny (Có đúng vậy không?) Giá trị cực lớn này, tỷ tỷ lần lớn hơn tuổi của vũ trụ, là kết quả của sự phát xạ yếu các sóng hấp dẫn do chuyển động tròn của các vật. Do đó, sự tồn tại Quyển II, trang 183 của các nguyên tử thông thường không cần tới Thuyết hấp dẫn lượng tử.

Các điều kỳ lạ về Thuyết lượng tử và lực hấp dẫn

Do lực hấp dẫn làm thay đổi phase của các hàm sóng, một số người không tin rằng nguồn nhiệt động lực gây ra sự mất điều hợp nên đã nghiên cứu về sự ảnh hưởng của lực hấp dẫn lên quá trình mất điều hợp của các hệ lượng tử thông thường trong không-thời gian Xem 145 phẳng. Ta có thể đoán trước được là các kết quả tính toán sẽ không tái hiện trong các thí nghiệm.

* *

Dù có cường độ yếu nhưng lực hấp dẫn cũng cho ta nhiều câu đố. Nổi tiếng nhất là người ta đã tìm thấy nhiều sự trùng hợp kỳ lạ khi kết hợp Cơ học lượng tử và lực hấp dẫn. Chúng thường được gọi là các 'giả thuyết số lớn' vì chúng thường có liên quan tới các số không thứ nguyên lớn. Một phiên bản đẹp nhưng ít nổi tiếng, kết nối chiều dài Xem 146 Planck, chân trời vũ trụ R_0 và số baryon N_b: theo hệ thức

$$(N_b)^3 \approx \left(\frac{R_0}{l_{Pl}}\right)^4 = \left(\frac{t_0}{t_{Pl}}\right)^4 \approx 10^{244} \qquad (31)$$

trong đó ta đã cho $N_b = 10^{81}$ và $t_0 = 1.2 \cdot 10^{10}$ a. Người ta vẫn chưa rõ lý do tại sao số baryon và kích thước chân trời R_0 lại liên hệ với nhau như vậy. Sự trùng hợp này tương đương với một phát biểu của Dirac,* cụ thể là

$$m_p^3 \approx \frac{\hbar^2}{Gct_0} \,. \qquad (33)$$

trong đó m_p là khối lượng proton. Đẳng thức gần đúng này cho ta thấy rằng hình như một số tính chất vi mô nào đó, cụ thể là khối lượng proton, có liên quan tới một số tính chất tổng quát của toàn thể vũ trụ. Điều này dẫn tới nhiều suy đoán, đặc biệt vì sự phụ thuộc vào thời gian của hai bên khác nhau. Một số người còn cho rằng các hệ thức (31) hay (33) biểu thị một số liên hệ, đã tìm được trước đó rất lâu, giữa các tính chất topo Xem 148 địa phương và toàn cục của thiên nhiên. Tới nay thì phát biểu đúng duy nhất có lẽ là *các sự trùng hợp* chỉ xảy ra vào thời điểm ta đang sống và không nên quá xem trọng những điều này.

* *

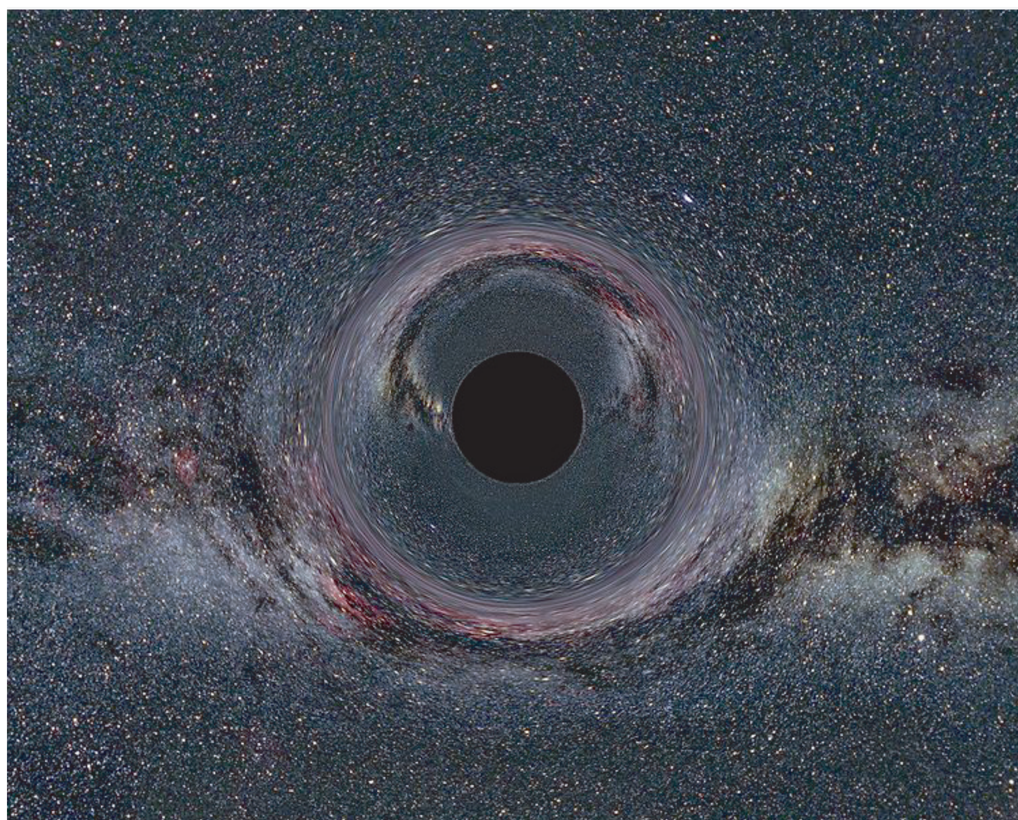
Photon chuyển động song song với nhau không hút nhau bằng lực hấp dẫn nên không làm lệch hướng nhau. Hai photon như vậy có thể tạo thành một trạng thái liên kết, một loại nguyên tử ánh sáng, trong đó chúng có thể quay quanh nhau, miễn là có đủ chỗ Câu đố 94 s trống cho việc này xảy ra hay không?

Tóm lại, lực hấp dẫn lượng tử không cần thiết trong đời sống hằng ngày. Tuy vậy, ta sẽ thấy là lực hấp dẫn lượng tử được cần đến trong các lĩnh vực xa hơn nhưng cũng hấp dẫn hơn.

Xem 147 * Ta có thể suy ra sự tương đương này bằng cách sử dụng hệ thức $Gn_b m_p = 1/t_0^2$, mà nhiều mô hình vũ trụ đòi hỏi như Weinberg đã giải thích. Thật vậy, ta có thể viết lại hệ thức này như sau
Quyển VI, trang 104

$$m_0^2/R_0^2 \approx m_{Pl}^2/R_{Pl}^2 = c^4/G^2 \,. \qquad (32)$$

Với định nghĩa của mật độ baryon là $n_b = N_b/R_0^3$ ta kiếm được giả thuyết số lớn của Dirac bằng cách thay proton cho pion. Nên chú ý là thời gian và chiều dài Planck là $\sqrt{\hbar G/c^5}$ và $\sqrt{\hbar G/c^3}$ là các đơn vị tự nhiên của thời gian và chiều dài. Ta sẽ nghiên cứu chúng nhiều hơn trong phần cuối của cuộc hành trình.



HÌNH 86 Một hình mô phỏng đã đơn giản hoá – không phải là hình chụp – về cách mà một hố đen có khối lượng 10 Mặt trời, bán kính Schwarzschild là 30 km, được nhìn từ một khoảng cách không đổi là 600 km, làm biến dạng hình ảnh của Ngân hà ở phía sau nó (image © Ute Kraus at www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de).

Lực hấp dẫn và các giới hạn của sự hỗn độn

> "Die Energie der Welt ist constant.
> Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu."
> Rudolph Clausius*

Quyển I, trang 261 Ta đã biết phát biểu nổi tiếng của Clausius, người đã khai sinh thuật ngữ 'entropy'. Ta cũng đã thấy rằng hằng số Boltzmann k là entropy nhỏ nhất trong thiên nhiên.

Lực hấp dẫn ảnh hưởng lên entropy nói riêng và lên Nhiệt động lực học nói chung như thế nào? Trong một thời gian dài, không ai quan tâm đến câu hỏi này. Cùng lúc đó, trong nhiều thập kỷ, cũng không có ai thắc mắc là trên lý thuyết có một entropy *cực đại* hay không. Năm 1973, tình trạng thay đổi một cách bất ngờ khi Jacob Bekenstein khám phá ra hai vấn đề có liên quan.

Xem 122 Bekenstein đang nghiên cứu các hệ quả do lực hấp dẫn trong Vật lý lượng tử. Ông nhận thấy rằng entropy S của một vật có năng lượng E và kích thước L liên hệ với nhau

* 'Năng lượng của vũ trụ thì không đổi. Entropy của nó dần tới một cực đại.'

theo biểu thức

$$S \leqslant EL\frac{k\pi}{\hbar c} \qquad (34)$$

đối với mọi hệ vật lý, trong đó k là hằng số Boltzmann. Đặc biệt, ông chứng minh được là *các hố đen* (không quay) có trạng thái liên kết bão hoà. Hố đen là các hệ có mật độ cao nhất đối với khối lượng đã có. Chúng là vật chất suy sụp hoàn toàn. Hình 86 là một tranh vẽ của hoạ sĩ.

Quyển II, trang 267

Câu đố 95 s

Bekenstein đã tìm được entropy của các hố đen là

$$S = A\,\frac{kc^3}{4G\hbar} = M^2\,\frac{4\pi kG}{\hbar c} \qquad (35)$$

trong đó A là diện tích của *chân trời* hố đen. Diện tích $A = 4\pi R^2 = 4\pi(2GM/c^2)^2$. Đặc biệt, kết quả này hàm ý rằng mỗi hố đen đều có một entropy. Như vậy các hố đen là các hệ hỗn độn được mô tả bằng Nhiệt động lực học. Đúng ra *hố đen là các hệ hỗn độn nhất trong các hệ đã biết.**

Có một lưu ý thú vị, entropy cực đại cũng dẫn đến một giới hạn trên cho dung lượng của một chip nhớ. Bạn có thể tìm ra giới hạn này không?

Câu đố 96 s

Entropy là một điều gì đó có vẻ huyền bí. Các vi trạng thái khác nhau dẫn tới entropy vĩ mô này là gì? Phải mất nhiều năm để các nhà vật lý đồng ý rằng các vi trạng thái bắt nguồn từ các trạng thái khả hữu khác nhau của chân trời hố đen và bằng cách nào đó chúng bắt nguồn từ bất biến vi đồng phôi tại giới hạn này. Như Gerard 't Hooft đã giải thích, biểu thức entropy hàm ý rằng số bậc tự do của một hố đen là gần bằng (nhưng không chính xác) 1 cho mỗi diện tích Planck của chân trời.

Xem 124

Câu đố 97 s

Nếu các hố đen có entropy, chúng phải có một nhiệt độ. Ý nghĩa của nhiệt độ này là gì? Đúng ra không có ai tin vào kết luận này cho tới khi nó được hai phát kiến không có liên hệ với nhau khẳng định trong một thời gian ngắn.

Đo gia tốc bằng nhiệt kế: bức xạ Fulling–Davies–Unruh

Độc lập với nhau, Stephen Fulling năm 1973, Paul Davies năm 1975 và William Unruh năm 1976 đã có cùng một khám phá lý thuyết trong khi nghiên cứu Thuyết lượng tử: nếu một quan sát viên quán tính nhận thấy anh ta đang bị chân không bao quanh, thì một quan sát viên thứ hai *có gia tốc* đối với người thứ nhất sẽ không thấy như vậy: anh ta sẽ thấy bức xạ của thể đen. Sự xuất hiện của bức xạ đối với một quan sát viên có gia tốc trong chân không được gọi là *hiệu ứng Fulling–Davies–Unruh*. Tất cả các kết quả về hố đen này đã chờ người ta khám phá từ thập niên 1930; điều khó tin là không có ai nghĩ

Xem 125

* Việc bàn luận chính xác xem các hố đen có phải là các hệ hỗn độn nhất trong thiên nhiên hay không là một việc khá rắc rối. Vấn đề này đã được Bousso tóm lược lại. Bousso cho rằng diện tích xuất hiện trong công thức của entropy cực đại không thể xem một cách đơn giản là diện tích ở thời điểm đã cho và đưa ra 4 luận cứ để giải thích lý do tại sao điều này bị cấm. Tuy vậy, cả 4 luận cứ đều có chỗ sai, đặc biệt vì chúng ta đã giả sử rằng có thể đo được các chiều dài nhỏ hơn chiều dài Planck hay lớn hơn kích thước vũ trụ. Mỉa mai thay, sau đó tự ông gạt bỏ các luận cứ trong bài báo rồi đưa ra một công thức cải tiến, chính là công thức bị ông phê bình lúc đầu, chỉ có diện tích A là được diễn dịch theo cách khác. Sau này, Bousso sửa lại kết luận; bây giờ ông quay sang ủng hộ liên kết có entropy cực đại. Tóm lại, biểu thức entropy của hố đen thật ra là entropy cực đại đối với một hệ vật lý có bề mặt A.

Xem 123

đến chúng trong suốt 40 năm sau đó.

Bức xạ này có một phổ năng lượng tương ứng với nhiệt độ

$$T = \frac{\hbar}{2\pi kc}\, a\ , \tag{36}$$

trong đó a là độ lớn của gia tốc. Kết quả này có nghĩa là không có chân không trên Trái đất vì một quan sát viên bất kỳ trên mặt đất đều có gia tốc $9.8\,\mathrm{m/s^2}$, tương ứng với $T = 40\,\mathrm{zK}$! Như vậy ta có thể đo trọng lực, ít nhất là về mặt nguyên tắc, bằng cách sử dụng một nhiệt kế. Tuy vậy, dù gia tốc trong thực tế có thể rất lớn thì nhiệt độ tương ứng lại rất nhỏ đến nỗi người ta không biết có thể chứng minh được hiệu ứng này bằng Xem 126 thực nghiệm theo cách này hay không. Nhưng nếu được thì đây là một kết quả thực nghiệm tuyệt đẹp.

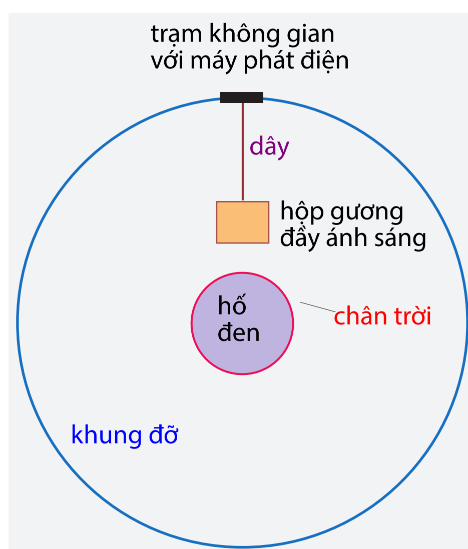
Khi hiệu ứng được tiên đoán, người ta đã tìm hiểu mọi phương diện khả hữu của luận điểm này. Thí dụ như một quan sát viên chuyển động quay cũng có thể phát hiện được bức xạ theo biểu thức (36). Nhưng đó chưa phải là tất cả. Người ta nhận thấy rằng việc gia tốc cho một *cái gương* sẽ dẫn tới việc *phát ra* các bức xạ! Việc gia tốc các gương như vậy khó hơn gia tốc các vật có cùng khối lượng.

Khi gia tốc đủ lớn, các hạt *vật chất* có thể phát ra và người ta có thể phát hiện được. Nếu một máy đếm hạt được gia tốc đủ nhanh trong chân không, nó sẽ bắt đầu đếm các hạt! Ta sẽ thấy rằng sự khác biệt giữa chân không và vật chất bị xoá mờ khi gia tốc lớn. Kết quả này sẽ đóng một vai trò quan trọng trong việc nghiên cứu để tìm Lý thuyết thống nhất, như ta sẽ thấy sau này.

Quyển VI, trang 65 Điều đáng ngạc nhiên là vào cuối thế kỷ 20 rõ ràng là người ta đã quan sát được hiệu ứng Fulling–Davies–Unruh *trước khi* nó được tiên đoán! Hoá ra hiệu ứng Fulling–Xem 127 Davies–Unruh có liên hệ với một thí nghiệm đã thực hiện: *hiệu ứng Sokolov–Ternov*. Năm 1963, vật lý gia Nga Igor Ternov, cùng với Arsenji Sokolov đã sử dụng phương trình Dirac để tiên đoán rằng electron trong các máy gia tốc và các máy gia tốc vòng lưu trữ có năng lượng cao sẽ bị phân cực một cách tự động. Tiên đoán này được chứng minh bằng thực nghiệm lần đầu tiên tại Viện vật lý hạt nhân Budker của Nga năm 1971 rồi sau đó tại Orsay, Stanford và Hamburg. Ngày nay, hiệu ứng này thường được sử dụng trong nhiều thí nghiệm với máy gia tốc. Trong thập kỷ 1980, Bell và Leinaas nhận thấy hiệu ứng Sokolov–Ternov *giống như* hiệu ứng Fulling–Davies–Unruh nhưng được quan sát Xem 127 từ một hệ quy chiếu khác! Về mặt nào đó thì sự tương đương này thật đáng kinh ngạc. Khi điện tích chuyển động trong một máy gia tốc vòng lưu trữ, bức xạ phát ra không phải là bức xạ nhiệt, nên sự tương tự không đơn giản và không phải là hiển nhiên. Nhưng hiệu ứng phân cực chùm hạt – cụ thể là sự khác nhau trong sự phát xạ photon có spin song song và đối song với từ trường – thì giống với hiệu ứng Fulling–Davies–Unruh. Như vậy ta lại có thêm một trường hợp mà khám phá lý thuyết có sau thực nghiệm rất lâu. Tuy vậy, vào năm 2006, sự tương đương này lại bị nghi ngờ nên vấn đề này vẫn chưa Xem 127 thể khép lại.

Màu của hố đen không phải là đen

Vào năm 1973 và 1974, Jacob Bekenstein, và một cách độc lập, Stephen Hawking, nổi tiếng vì nỗ lực chiến đấu với bệnh tật đã trói chân ông vào chiếc xe lăn, đã làm thế giới



HÌNH 87 Một thí nghiệm tưởng tượng cho phép bạn suy ra sự hiện hữu của bức xạ của hố đen.

của Thuyết tương đối tổng quát ngạc nhiên vì một khám phá lý thuyết cơ bản. Họ đã thấy rằng nếu một cặp hạt–phản hạt ảo xuất hiện trong chân không gần chân trời, thì sẽ có một cơ hội hiếm hoi để một hạt thoát ra trở thành một hạt thực còn phản hạt ảo sẽ bị hố đen bắt giữ. Phản hạt ảo sẽ có năng lượng âm và làm giảm khối lượng của hố đen. Cơ chế này áp dụng cho fermion lẫn boson. Nhìn từ xa hiệu ứng này trông giống như hiện tượng phát ra một hạt. Khi nghiên cứu kỹ người ta thấy rằng hiệu ứng này thấy rõ nhất đối với sự phát xạ photon. Tóm lại, Bekenstein và Hawking đã chứng tỏ rằng *các hố đen bức xạ giống như một thể đen.*

Bức xạ của hố đen khẳng định cả hai kết quả về entropy của hố đen của Bekenstein và hiệu ứng các quan sát viên có gia tốc trong chân không được Fulling, Davies và Unruh tìm ra. Khi mọi điều trở nên rõ ràng, một thí nghiệm tưởng tượng thú vị đã được William Xem 128 Unruh và Robert Wald công bố, chứng tỏ rằng toàn bộ kết quả này đã được tìm thấy từ 50 năm trước!

Xấu hổ vì sự chậm lụt trong việc khám phá thì dành cho cộng đồng của các nhà vật lý lý thuyết, còn bản thân câu chuyện thì vẫn hay. Chuyện bắt đầu từ những năm đầu của thập niên 1970, khi Robert Geroch nghiên cứu vấn đề được biểu diễn trong Hình 87. Hãy tưởng tượng một hộp gương đầy bức xạ nhiệt, tức là đầy ánh sáng. Khối lượng hộp không đáng kể, thí dụ như hộp làm bằng giấy nhôm mỏng. Ta hạ thấp hộp cùng với bức xạ bên trong nó, từ một trạm không gian về phía một hố đen. Về phần trạm không gian việc hạ thấp khối bức xạ nhiệt sẽ làm phát sinh năng lượng. Điều hiển nhiên là khi hộp đến chân trời hố đen, bức xạ nhiệt này sẽ dịch chuyển đỏ tới bước sóng vô hạn. Ngay lúc đó, toàn bộ năng lượng ban đầu chứa trong bức xạ nhiệt này được cung cấp cho trạm không gian. Bây giờ ta có thể làm như sau: mở hộp khi ở chân trời để đổ mọi vật bên trong ra ngoài và cuộn hộp rỗng và không khối lượng trở lại. Kết quả là ta đã biến đổi hoàn toàn bức xạ nhiệt thành cơ năng. Mọi thứ khác đều không đổi: hố đen vẫn có khối lượng như trước.

Nhưng việc không có gì thay đổi lại mâu thuẫn với Nguyên lý 2 của Nhiệt động lực

học! Geroch kết luận là phải có gì đó không đúng. Ta đã bỏ quên một hiệu ứng sẽ ngăn không cho quá trình này xảy ra.

Vào thập niên 1980, William Unruh và Robert Wald đã chứng tỏ rằng bức xạ của hố đen đúng là hiệu ứng đã bị bỏ quên có thể làm cho mọi điều đâu lại vào đó. Vì bức xạ của hố đen, hộp sẽ chịu một lực nâng nên ta không thể hạ thấp hộp đến chân trời một cách hoàn toàn. Hộp sẽ nổi trên chân trời nên bức xạ nhiệt bên trong nó chưa đạt tới mức *zero* khi rơi ra khỏi hộp. Kết quả là khối lượng của hố đen sẽ tăng và entropy cũng tăng khi hộp được mở ra. Tóm lại, khi hộp rỗng được kéo lên lại, tình trạng sau cùng sẽ như sau: một phần năng lượng của bức xạ nhiệt biến đổi thành cơ năng, một phần năng lượng sẽ làm gia tăng khối lượng và entropy của hố đen. Nguyên lý 2 của Nhiệt động lực học được cứu vãn.

Như vậy Nguyên lý 2 chỉ được cứu vãn nếu bức xạ nhiệt có mật độ năng lượng thích hợp ở ngay trên chân trời. Ta hãy xem xét vấn đề này. Tâm của hộp chỉ có thể hạ thấp đến một khoảng cách d bên trên chân trời. Ở chân trời, gia tốc do lực hấp dẫn là $g_{\text{surf}} = c^4/4GM$. Năng lượng E có được do việc hạ thấp hộp là

$$E = c^2 m - m g_{\text{surf}} \frac{d}{2} = c^2 m \left(1 - \frac{dc^2}{8GM}\right) . \qquad (37)$$

Hiệu suất của quá trình là $\eta = E/c^2 m$. Để nhất quán với Nguyên lý 2, hiệu suất này phải tuân theo công thức

$$\eta = \frac{E}{c^2 m} = 1 - \frac{T_{\text{BH}}}{T} , \qquad (38)$$

Trong đó T là nhiệt độ của bức xạ trong hộp. Như vậy ta tìm được nhiệt độ hố đen T_{BH} được xác định bởi d. Khoảng cách này có thể xem như có kích cỡ của hộp. Kích thước của hộp ít nhất phải bằng bước sóng của bức xạ nhiệt; ở mức gần đúng bậc nhất, hệ thức Wien cho ta $d \approx \hbar c/kT$. Khi tính chính xác có đưa vào thừa số π, thì kết quả là

$$T_{\text{BH}} = \frac{\hbar c^3}{8\pi kGM} = \frac{\hbar c}{4\pi k}\frac{1}{R} = \frac{\hbar}{2\pi kc}\, g_{\text{surf}} \quad \text{với} \quad g_{\text{surf}} = \frac{c^4}{4GM} , \qquad (39)$$

trong đó R và M là bán kính và khối lượng của hố đen. Đại lượng T_{BH} được gọi là *nhiệt độ hố đen* hay *nhiệt độ Bekenstein–Hawking*. Thí dụ một hố đen có khối lượng như Mặt trời thì nhiệt độ nhỏ hơn 62 nK một chút, trong khi một hố đen nhỏ hơn có khối lượng như một ngọn núi, là 10^{12} kg, thì nhiệt độ là 123 GK. Đây sẽ là một lò nướng khá tốt. Mọi ứng viên hố đen mà ta đã biết có khối lượng trong khoảng từ vài Mặt trời tới vài triệu Mặt trời. Như vậy bức xạ này cực yếu – yếu đến nỗi ta không thể phát hiện được.

Lý do yếu ớt của bức xạ hố đen là bước sóng phát xạ có cỡ của bán kính hố đen, và bạn có thể tự kiểm chứng điều này. Bức xạ do hố đen phát ra cũng thường được gọi là
Xem 129
bức xạ Bekenstein–Hawking.

Dĩ nhiên mọi Nguyên lý của nhiệt động lực học đều đúng cho hố đen. Một bảng tóm tắt ý nghĩa của mỗi nguyên lý trong trường hợp hố đen được cho trong Bảng 10.

Bức xạ của hố đen yếu đến nỗi giống như ta đang nói về một hiệu ứng không thực tế! Điều này dẫn tới việc độ trưng tăng lên khi khối lượng hay kích thước giảm theo phương

BẢNG 10 Các Nguyên lý của Nhiệt động lực học và các Nguyên lý của Cơ học chân trời.

Nguyên lý	Nhiệt động lực học	Cơ học chân trời
Nguyên lý 0	nhiệt độ T của mọi điểm trong một vật cân bằng nhiệt thì như nhau	gia tốc hấp dẫn a trên khắp bề mặt chân trời thì như nhau
Nguyên lý 1	năng lượng được bảo toàn: $\mathrm{d}E = T\mathrm{d}S - p\mathrm{d}V + \mu\mathrm{d}N$	năng lượng được bảo toàn: $\mathrm{d}(c^2 m) = \frac{ac^2}{8\pi G}\mathrm{d}A + \Omega\mathrm{d}J + \Phi\mathrm{d}q$
Nguyên lý 2	entropy không bao giờ giảm: $\mathrm{d}S \geqslant 0$	diện tích chân trời không bao giờ giảm: $\mathrm{d}A \geqslant 0$ (trừ trường hợp bức xạ của hố đen)
Nguyên lý 3	không thể đạt tới giá trị $T = 0$	không thể đạt tới giá trị $a = 0$

Câu đố 98 ny

trình

$$L \sim \frac{1}{M^2} \sim \frac{1}{R^2} \quad \text{hay} \quad L = nA\sigma T^4 = \frac{n}{15 \cdot 2^{11}\pi} \frac{c^6\hbar}{G^2M^2} \qquad (40)$$

Quyển III, trang 238
Xem 130

trong đó σ là hằng số Stefan–Boltzmann hay *hằng số bức xạ của thể đen*, n là số bậc tự do của hạt bức xạ; chỉ khi các photon được phát ra – trường hợp duy nhất có ý nghĩa thực tiễn – ta có $n = 2$.

Như vậy các hố đen chói sáng và càng sáng khi chúng càng nhỏ. Thí dụ một hố đen có khối lượng như Mặt trời phát xạ ít hơn 0.1 xW. Đây là một hiệu ứng đúng nghĩa *lượng tử* vì theo vật lý cổ điển hố đen như tên gọi của nó không phát ra chút ánh sáng nào. Mặc dù hiệu ứng này cực yếu nhưng sau này nó sẽ trở nên quan trọng. Trong các hệ thực tế, nhiều hiệu ứng khác quanh các hố đen làm độ trưng lớn hơn giá trị của Bekenstein–Hawking; thật vậy, hố đen thường sáng hơn các ngôi sao bình thường bắt nguồn từ các bức xạ do vật chất rơi vào chúng phát ra. Nhưng đó là một câu chuyện khác. Ở đây ta đang xem xét các hố đen cô lập, chỉ có chân không thuần tuý bao quanh.

Thời gian sống của các hố đen

Do sự phát xạ các bức xạ, khối lượng hố đen dần dần giảm đi. Như vậy cuộc đời theo lý thuyết của chúng là *hữu hạn*. Tính toán đã chứng tỏ rằng thời gian sống được cho bởi

Câu đố 99 ny

phương trình

$$t = M^3 \frac{20\,480\,\pi G^2}{\hbar c^4} \approx M^3\ 3.4 \cdot 10^{-16}\ \mathrm{s/kg^3} \qquad (41)$$

là một hàm của khối lượng ban đầu M. Thí dụ, một hố đen có khối lượng 1 g sẽ có cuộc đời dài $3.4 \cdot 10^{-25}$ s, trong khi một hố đen có khối lượng của Mặt trời, $2.0 \cdot 10^{30}$ kg, sẽ có thời gian sống vào khoảng 10^{68} năm. Một lần nữa, những con số này chỉ có giá trị lý thuyết. Điều quan trọng là *các hố đen hoá hơi*. Tuy vậy quá trình cực kỳ chậm chạp này đối với các hố đen thông thường chỉ xác định thời gian sống của chúng nếu không có

các quá trình khác nhanh hơn xảy ra. Ta sẽ trình bày một số quá trình như vậy. Bức xạ Bekenstein–Hawking là hiệu ứng yếu nhất trong các hiệu ứng đã biết. Nó không bị các hiệu ứng mạnh hơn che lấp chỉ trong trường hợp hố đen không quay, trung hoà về điện và không có vật chất xung quanh rơi vào nó.

Tính cho đến nay chưa có hiệu ứng hấp dẫn lượng tử nào được kiểm chứng bằng thực nghiệm, do chúng quá nhỏ nên người ta không thể phát hiện được. Tuy vậy, những kết luận về nhiệt độ Hawking đã được khẳng định một cách thuyết phục bằng khám phá Xem 131 lý thuyết của William Unruh, người đã nhận thấy rằng có những cấu hình lưu chất mà sóng âm không thể thoát ra được, đó là '*các hố im lặng*'. Kết quả là các hố im lặng này phát ra các sóng âm có nhiệt độ nghiệm đúng công thức tương tự công thức của các hố Xem 132 đen thực. Một loại hệ thống tương tự được gọi là *các hố đen quang học*, cũng đang được nghiên cứu.

Hố đen ở khắp mọi nơi

Vào khoảng năm 2000, các thiên văn gia gom góp được một số lớn sự kiện cho thấy có nhiều điều đáng kinh ngạc: hầu hết các thiên hà đều có thể có hố đen *siêu trọng* ở trung tâm. Nổi tiếng nhất là hố đen ở tâm Ngân hà của chúng ta. Các quasar, các nhân thiên hà hoạt động và các bùng nổ tia gamma hình như bắt nguồn từ các hố đen này. Khối lượng của các hố đen này thường lớn hơn 1 triệu khối lượng của Mặt trời.

Các thiên văn gia cũng nghĩ rằng có nhiều thiên thể nhỏ khác có chứa các hố đen: các nguồn tia X cực mạnh và các sao đôi tia x là các ứng viên cho hố đen có khối lượng *trung bình*.

Sau cùng, một cách giải thích có triển vọng về vật chất tối ở ngoại vi các thiên hà là đám mây giả định của các hố đen *nhỏ*.

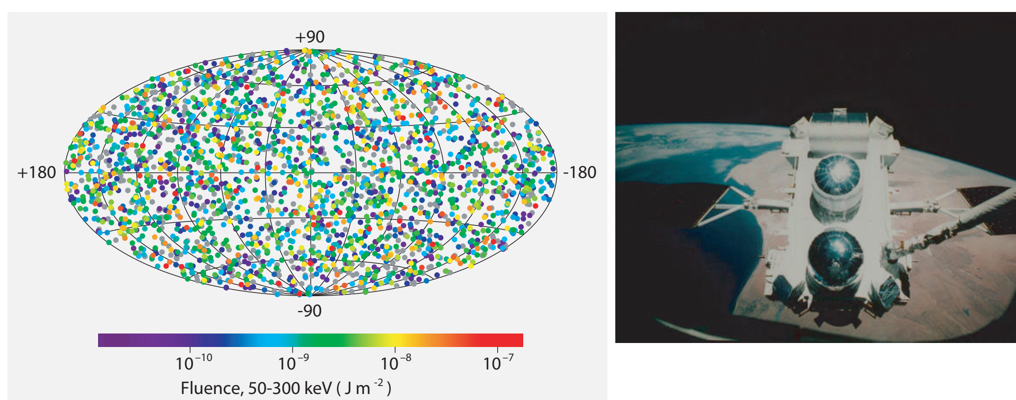
Tóm lại, hình như hố đen rất phổ biến trong vũ trụ. Khi các thiên văn gia thấy một lớp vật thể mới thì có 2 câu hỏi phát sinh: các vật thể này được hình thành như thế nào? và chúng biến mất như thế nào? Ta đã biết rằng Cơ học lượng tử đã đặt một giới hạn trên cho thời gian sống của hố đen. Giới hạn này mang tính lý thuyết nhưng không quan trọng. Điểm chính là sự hiện hữu của nó. Thật vậy, các thiên văn gia đều nghĩ rằng phần lớn các hố đen biến mất theo những cách khác nhau và trước giới hạn Bekenstein–Hawking rất lâu, thí dụ như thông qua sự hợp nhất với nhau. Mọi điều vẫn đang được nghiên cứu. Máy phát hiện sóng hấp dẫn có thể làm rõ các vấn đề này trong tương lai .

Quyển II, trang 178 Hố đen đã được sinh ra như thế nào? Hoá ra người ta có thể quan sát được sự ra đời của các hố đen.

Các bùng nổ tia gamma ngoạn mục

Các vụ nổ hạt nhân sinh ra các ánh chớp của tia γ, hay tia gamma. Trong thập niên 1960, nhiều quốc gia nghĩ rằng việc phát hiện chớp γ hay tốt hơn, sự vắng mặt của chúng bằng cách sử dụng các vệ tinh, sẽ là cách tốt nhất để bảo đảm cho việc không có ai kích nổ bom hạt nhân trên mặt đất. Nhưng khi quân đội phóng các vệ tinh lên trời để kiểm tra những chớp sáng như vậy, họ đã khám phá ra nhiều điều đáng kinh ngạc. Họ thấy có khoảng 2 chớp γ *mỗi* ngày. Vì sợ bị chế giễu, họ giữ kín điều này trong nhiều năm.

Phải mất 6 năm quân đội mới hiểu được điều mà các nhà thiên văn nói với họ trong 5 phút: các chớp sáng, ngày nay được gọi là *các bùng nổ tia gamma*, đã và đang tới từ Xem 134 không gian. Sau cùng, người ta đã công bố các kết quả;đây có lẽ là khám phá duy nhất



HÌNH 88 Vị trí và năng lượng của 2704 vụ bùng nổ tia γ quan sát được trên bầu trời từ 1991 tới 2000 qua thí nghiệm BATSE thực hiện trên Đài quan trắc tia gamma Compton,– được phi thuyền con thoi đưa lên không gian, sau hơn 20 năm thiết kế và tạo dựng. Ngân hà bao quanh đường nằm ngang chạy từ +180 tới −180 (NASA).

do quân đội thực hiện. Một vệ tinh khác, lần này do khoa học gia tạo ra, Đài quan trắc tia gamma Compton, đã khẳng định rằng các bùng nổ có nguồn gốc *ngoại thiên hà*, như bản đồ Hình 88 cho thấy.

Việc đo đạc các bùng nổ tia gamma được thực hiện bằng vệ tinh vì phần lớn các tia gamma không thể xuyên qua khí quyển. Năm 1996, vệ tinh BeppoSAX của Ý và Hoà Lan đã bắt đầu vẽ bản đồ và đo các bùng nổ tia gamma một cách có hệ thống. Người ta đã khám phá ra rằng sau khi bùng nổ là *dư huy* trong phạm vi của tia X, kéo dài nhiều giờ hay có khi cả ngày. Năm 1997, người ta khám phá được dư huy trong vùng quang học. Vệ tinh cũng cho phép các nhà nghiên cứu tìm thấy các nguồn tia X, ánh sáng và vô tuyến của các bùng nổ tương ứng. Các đo đạc này cũng cho ta xác định được khoảng cách tới các nguồn gây ra bùng nổ; người ta đo được các dịch chuyển đỏ nằm trong
Xem 135
khoảng 0.0085 và 4.5. Sau cùng vào năm 1999, người ta đã phát hiện các bùng nổ *quang học* tương ứng với các bùng nổ tia gamma.*

Tất cả các dữ liệu này đã chứng tỏ rằng các bùng nổ tia gamma kéo dài từ 1 ms tới khoảng 1 giờ. Hình như chúng phân làm (ít nhất là) 2 loại: *bùng nổ ngắn*, dưới 3 s, được phát ra từ các nguồn ở gần và *bùng nổ lâu dài*, do các thiên hà ở xa phát ra, thời gian
Xem 137
kéo dài thường là 30 s hay lâu hơn, có phổ năng lượng mịn hơn.Bùng nổ dài có độ trưng
Câu đố 100 s
khoảng 10^{45} W, tức là 1/100 độ sáng của mọi ngôi sao trong toàn bộ vũ trụ khả kiến! Nói cách khác, nó là năng lượng toả ra khi ta biến nhiều Mặt trời thành bức xạ chỉ trong vài giây.

Đúng ra độ trưng của các bùng nổ dài đã đo được, gần bằng độ trưng cực đại theo lý thuyết mà một vật có thể có. Giới hạn này tuân theo hệ thức
Quyển II, trang 110

$$L < L_{\text{Pl}} = \frac{c^5}{4G} = 0.9 \cdot 10^{52}\ \text{W}\ , \qquad (42)$$

* Để có thêm chi tiết về vấn đề hấp dẫn này, hãy tham khảo trang www.aip.de/~jcg/grb.html của Jochen Greiner.

Câu đố 101 e và bạn có thể tự kiểm chứng điều này. Tóm lại, các nguồn bùng nổ tia gamma là các quả bom lớn nhất mà ta có thể tìm được trong vũ trụ. Chúng là các vụ nổ có quy mô lớn kinh khủng. Các nghiên cứu gần đây cho thấy rằng các bùng nổ tia gamma dài không có tính đẳng hướng mà được *chiếu ra thành từng chùm* nên giá trị cường độ khổng lồ đề cập ở trên có thể phải chia cho một hệ số là 1000.

Tuy vậy, cơ chế dẫn tới sự phát xạ tia gamma vẫn chưa rõ ràng. Người ta thường cho rằng các bùng nổ ngắn bắt nguồn từ sự hợp nhất các sao neutron, trong khi các bùng nổ dài được phát ra khi một hố đen được tạo ra trong một vụ nổ của siêu tân tinh hay Xem 135 siêu siêu tân tinh. Trong trường hợp này, các bùng nổ dài sẽ là 'các tiếng thét ban sơ' của các hố đen *khi thành lập*. Tuy vậy, có một giải thích khác cho rằng các bùng nổ dài bắt nguồn từ *sự lìa đời* của các hố đen.

Thật vậy, từ năm 1975, Damour và Ruffini đã đề ra một cơ chế phát xạ mãnh liệt các Xem 133 bức xạ của hố đen *có điện tích*, đang hấp hối.Hố đen tích điện có thời gian sống ngắn hơn hố đen trung hoà rất nhiều, vì trong lúc hình thành, có một quá trình thứ 2 xảy ra. Trong một vùng bao quanh chúng, điện trường lớn hơn độ phân cực của chân không nên sẽ có một số lớn các cặp electron-positron được sinh ra, rồi sau đó lại huỷ biến gần hết. Quá trình này làm giảm đáng kể điện tích của hố đen khiến điện trường xuống dưới trị tới hạn, đồng thời phát ra một lượng lớn ánh sáng có năng lượng cao. Thành ra khối lượng bị giảm đi 30 % trong vài giây. Thời gian đó ngắn hơn con số 10^{68} năm được tiên đoán theo bức xạ Bekenstein–Hawking khá nhiều! Quá trình này tạo ra một bùng nổ tia gamma cực mạnh.

Năm 1997 Ruffini lấy lại mô hình 1975 của ông và đã cùng với các cộng sự chứng tỏ rằng các bùng nổ tia gamma đã được sinh ra từ sự huỷ biến các cặp electron-positron – do sự phân cực chân không tạo ra, trong một vùng được gọi là *dyadosphere*, có độ trưng và thời gian phát sáng đúng như đã đo, nếu hố đen có khối lượng khoảng từ một vài tới 30 khối lượng Mặt trời. Điện tích và khối lượng của hố đen tích điện sẽ giảm đi do sự phân cực chân không và quá trình sinh cặp electron positron. (Quá trình làm giảm khối lượng vì nó là một trong một số ít quá trình *thuận nghịch*; trái lại, phần lớn các nỗ lực làm giảm điện tích của hố đen, tức là bằng cách ném đi một hạt có điện tích đối, lại làm tăng khối lượng của hố đen và quá trình như vậy sẽ không có tính thuận nghịch.) Phần còn lại sẽ mất năng lượng theo nhiều cách khác nhau và là nguyên nhân của dư huy mà vệ tinh BeppoSAX đã phát hiện. Nhóm Ruffini còn cho rằng các tàn dư là nguồn của các tia vũ trụ có năng lượng cao, mà cho đến nay ta vẫn chưa rõ nguồn gốc của chúng. Tất Xem 136 cả các nghiên cứu lý thú này vẫn còn tiếp diễn.

Việc tìm hiểu các bùng nổ tia gamma dài là một trong các vấn đề mở hấp dẫn nhất trong Vật lý thiên văn. Người ta đã công nhận nó có liên hệ với hố đen. Nhưng có thể có nhiều quá trình dẫn tới sự phát xạ các bức xạ từ hố đen. Thí dụ như do vật chất rơi vào hố đen rồi bị nung nóng lên hay vật chất bắn ra từ các hố đen đang quay thông qua quá trình Penrose, hay các điện tích rơi vào hố đen. Người ta đã biết các cơ chế này; chúng là Quyển II, trang 276 nguồn gốc của *các quasar*– các nguồn chuẩn tinh cực sáng được tìm thấy khắp nơi trên bầu trời. Chúng được giả sử là các hố đen có vật chất bao quanh, trong giai đoạn phát triển theo sau sự bùng nổ tia gamma. Nhưng dù có nhiều sự kiện xảy ra trong các quasar thì các chủ đề được nghiên cứu nhiều trong Vật lý thiên văn vẫn là hiệu thế khổng lồ (lên tới 10^{20} V) và từ trường phát sinh cũng như tác dụng của chúng lên vật chất xung quanh.

Các tính chất của vật liệu trong hố đen

Một khi khái niệm entropy của hố đen đã được thiết lập thì người ta bắt đầu nghĩ về hố đen giống như các vật thể vật chất khác. Thí dụ như hố đen có mật độ vật chất, được định nghĩa bằng cách liên hệ khối lượng của chúng với một thể tích tưởng tượng $4\pi R^3/3$, trong đó R là bán kính của chúng. Mật độ này là

$$\rho = \frac{1}{M^2} \frac{3c^6}{32\pi G^3} \qquad (43)$$

và có thể là khá nhỏ đối với các hố đen lớn. Đối với các hố đen lớn nhất mà ta biết, có khối lượng 1 tỷ khối lượng Mặt trời hay lớn hơn, mật độ này giống như mật độ không khí. Tuy vậy, ngay cả trong trường hợp này, thì đó vẫn là mật độ lớn nhất trong thiên nhiên đối với một khối lượng như vậy.

Cũng cần nói thêm là gia tốc hấp dẫn ở chân trời vẫn còn đáng kể, vì nó được cho bởi công thức

$$g_{\text{surf}} = \frac{1}{M} \frac{c^4}{4G} = \frac{c^2}{2R} \qquad (44)$$

Câu đố 102 e tức là 15 km/s^2 đối với hố đen có mật độ cỡ không khí.

Điều hiển nhiên là nhiệt độ hố đen liên hệ với entropy S theo định nghĩa thông thường

$$\frac{1}{T} = \left.\frac{\partial S}{\partial E}\right|_\rho = \left.\frac{\partial S}{\partial (c^2 M)}\right|_\rho \qquad (45)$$

Tất cả các tính chất nhiệt khác đều có thể suy ra bằng các hệ thức tiêu chuẩn của Tĩnh nhiệt học.

Đặc biệt, hố đen là các hệ trong thiên nhiên có entropy khả hữu lớn nhất. Bạn có thể chứng minh điều này không? (Câu đố 103 e)

Hoá ra các hố đen có nhiệt dung *âm*: khi nhận thêm nhiệt, chúng lạnh đi. Nói cách khác, hố đen không thể cân bằng nhiệt với các nguồn nhiệt động lực. Điều này cũng không lạ vì một hệ vật chất liên kết bằng lực hấp dẫn *bất kỳ* đều có nhiệt dung riêng âm. Thật vậy, chỉ cần suy nghĩ một chút là ta thấy ngay rằng một hệ khí hay vật chất bất kỳ đều suy sụp do lực hấp dẫn theo các hệ thức $dE/dR > 0$ và $dS/dR > 0$. Điều đó có nghĩa (Câu đố 104 ny) là trong khi suy sụp, năng lượng và entropy của hệ nhỏ lại. (Bạn có biết chúng đi đâu không?) (Câu đố 105 s) Vì nhiệt độ được định nghĩa là $1/T = dS/dE$ nên nhiệt độ luôn luôn dương; từ việc độ tăng nhiệt độ $dT/dR < 0$ trong khi suy sụp ta suy ra nhiệt dung riêng dE/dT âm. Xem 138

Các hố đen giống như các vật thể khác đều dao động khi gặp các nhiễu loạn nhỏ. Các dao động này cũng đã được nghiên cứu; tần số của chúng tỷ lệ với khối lượng của hố đen. Xem 139

Các hố đen không quay không có từ trường, như các nhà vật lý Nga đã chứng minh vào thập niên 1960. Xem 130 Mặt khác, các hố đen còn các tính chất liên quan tới độ dẫn điện và độ nhớt hữu hạn. Một số tính chất này có thể hiểu được nếu chân trời được mô tả như một tấm màn, Xem 140 mặc dù mô hình này không phải luôn luôn khả dụng. Trong mọi trường hợp, ta đều có thể nghiên cứu và mô tả các hố đen vĩ mô cô lập giống như một vật vĩ mô

bất kỳ khác. Vấn đề này chưa khép lại.

Các hố đen bay hơi như thế nào?

Khi một hố đen không quay và không mang điện thì khối lượng sẽ bị mất đi do bức xạ Hawking. Khối lượng của nó giảm dần tới khối lượng Planck, cụ thể là vài microgram. Biểu thức (41) của thời gian sống, áp dụng cho một hố đen có khối lượng Planck, sẽ cho một giá trị trên 60000 lần thời gian Planck. Một giá trị lớn lạ thường. Điều gì xảy ra trong những khoảnh khắc bay hơi sau cùng đó?

Một hố đen có khối lượng gần bằng khối lượng Planck vào một lúc nào đó sẽ trở nên nhỏ hơn bước sóng Compton của nó; điều đó có nghĩa là nó sẽ hành xử giống như một hạt sơ cấp, và đặc biệt, ta phải tính đến các hiệu ứng lượng tử. Người ta vẫn chưa biết các bước bay hơi sau cùng này diễn ra như thế nào, khối lượng tiếp tục giảm liên tục hay từng bước (thí dụ như khối lượng giảm đi tỷ lệ với $\sqrt{n}$ khi n dần tới 0), cấu trúc bên trong thay đổi như thế nào, hố đen ở trạng thái dừng có bắt đầu quay (như tác giả đã tiên đoán) hay không, hay bức xạ phát ra khác với bức xạ thể đen như thế nào. Vẫn còn nhiều điều để tìm hiểu. Tuy vậy, có một vấn đề quan trọng *đã* được giải quyết.

Nghịch lý thông tin của các hố đen

Khi người ta phát hiện bức xạ nhiệt của hố đen, có một vấn đề được tranh luận kịch liệt trong nhiều năm. Vật chất tạo thành hố đen có thể chứa nhiều thông tin; thí dụ như ta có thể tưởng tượng hố đen đã được sinh ra do một lượng lớn sách vở suy sụp vào nhau. Mặt khác, một hố đen phát ra các bức xạ nhiệt cho đến khi nó bay hơi. Vì bức xạ nhiệt không mang theo thông tin nên có vẻ như thông tin biến mất hay một cách tương ứng là entropy tăng lên.

Một số khổng lồ các bài báo đã viết về vấn đề này, một số còn cho rằng thí dụ này chứng tỏ Vật lý mà ta biết thì sai và cần phải thay đổi. Như thường lệ, để giải quyết vấn đề này, ta cần để ý đến tính chính xác, gạt bỏ các thành kiến qua một bên. Có 3 câu hỏi trung gian có thể giúp ta tìm ra câu trả lời.

— Điều gì sẽ xảy ra khi ta ném một cuốn sách vào trong Mặt trời? Thời điểm và cách thức mà thông tin bức xạ ra bên ngoài?
— Độ chính xác của câu phát biểu hố đen phát ra bức xạ *nhiệt*? Có thể có một sai lệch nhỏ không?
— Độ sai lệch này có đo được không? Hố đen bức xạ thông tin bằng cách nào?

Câu đố 106 e Bạn có thể tự trả lời trước khi đọc tiếp.

Ta hãy lướt qua một vài điều tóm tắt. Khi một cuốn sách hay một vật phức tạp khác – hay có entropy nhỏ – được ném vào trong Mặt trời, thông tin chứa trong vật sẽ bức xạ ra ngoài. Thông tin này chứa trong độ sai biệt nhỏ so với bức xạ của hố đen, cụ thể là trong các độ tương quan nhỏ giữa bức xạ phát ra với thời gian cháy của Mặt trời. Với một phép tính đơn giản so sánh entropy của một cuốn sách ở nhiệt độ phòng và thông tin chứa trong nó, cho ta thấy rằng các hiệu ứng này rất nhỏ, khó mà đo được.

Xem 141 Don Page đã giải thích rõ ràng về vấn đề này. Ông đã tính toán lượng thông tin đo được trong bức xạ nếu hệ hố đen và bức xạ *cùng* ở trong một trạng thái *thuần* tức là một trạng thái chứa các thông tin đặc trưng. Kết quả khá đơn giản. Dù hệ có lớn – bao gồm nhiều bậc tự do – và trong trạng thái thuần, thì một *phân hệ* nhỏ hơn gần như là một hệ nhiệt hoàn toàn. Đặc biệt hơn, nếu toàn bộ hệ thống có thứ nguyên không gian Hilbert

$N = nm$, trong đó n và $m \leqslant n$ là các thứ nguyên của 2 phân hệ và nếu nguyên cả hệ ở
Câu đố 107 ny
trong trạng thái thuần thì phân hệ m sẽ có entropy S_m được cho bởi phương trình

$$S_m = \frac{1-m}{2n} + \sum_{k=n+1}^{mn} \frac{1}{k} \tag{46}$$

hoặc một cách gần đúng là

$$S_m = \ln m - \frac{m}{2n} \quad \text{khi} \quad m \gg 1\,. \tag{47}$$

Để bàn luận về kết quả này ta hãy nghĩ về n và m giống như việc đếm các bậc tự do, thay vì các thứ nguyên không gian Hilbert. Số hạng đầu tiên trong phương trình (47) là entropy thông thường của một trạng thái hỗn hợp. Số hạng thứ 2 là một độ lệch nhỏ, mô tả lượng thông tin đặc trưng chứa trong trạng thái thuần ban đầu; thay số, ta thấy rằng nó rất nhỏ so với số hạng thứ nhất. Nói cách khác, phân hệ m gần như không thể phân biệt với trạng thái hỗn hợp; nó trông giống như một hệ nhiệt mặc dù không phải.

Tính toán cho ta thấy rằng số hạng nhỏ thứ 2 bên phải của phương trình (47) thực ra cũng đủ để có bức xạ thông tin bên trong ra ngoài, trong thời gian sống của hố đen. Page tiếp tục chứng tỏ rằng số hạng thứ 2 nhỏ đến nỗi không chỉ nó bị mất đi trong các phép đo mà còn mất đi trong các tính toán nhiễu loạn thông thường của các hệ vật lý.

Bây giờ ta đã có thể trả lời trực tiếp câu hỏi là có thể đo được thông tin bức xạ ra ngoài hay không. Như Don Page đã chứng minh, dù ta đo phân nửa hệ thống thì cũng
Xem 142
chỉ có khoảng 1/2 bit thông tin bức xạ. Như vậy ta cần đo *hầu hết* các bức xạ để kiếm được một lượng thông tin bức xạ đáng kể. Nói cách khác, rất khó xác định lượng thông tin chứa trong bức xạ của một hố đen.

Tóm lại, tại một thời điểm bất kỳ, lượng thông tin do hố đen bức xạ không đáng kể so với toàn bộ bức xạ của hố đen; trong thực tế ta không thể kiếm được thông tin có giá trị qua các phép đo hay ngay cả qua các tính toán sử dụng các phép tính gần đúng thông thường.

Thêm một số nghịch lý

Hố đen là một vật vĩ mô tương tự như một ngôi sao. Giống như các vật khác, nó có thể tương tác với môi trường. Nó có tính chất đặc biệt là có thể nuốt mọi vật rơi vào nó. Điều này đặt ra vấn đề là liệu ta có thể sử dụng tính chất này để phá vỡ các 'định luật' thông thường của thiên nhiên hay không. Đã có nhiều nghiên cứu trong phần Thuyết tương đối tổng quát và phần trên đây; ở đây ta tìm hiểu thêm một vài điều nữa.

Quyển II, trang 281

* *

Bỏ qua các câu hỏi về entropy, ta có thể tìm các phương pháp để phá vỡ định luật bảo
Câu đố 108 ny
toàn năng lượng, bảo toàn moment động lượng hay bảo toàn điện tích. Nhưng mọi thí nghiệm tưởng tượng đều dẫn tới các kết luận giống nhau. Không nỗ lực nào đạt được kết quả. Mọi lý luận đều khẳng định rằng số bậc tự do cực đại trong một miền thì tỷ lệ với diện tích bề mặt của miền đó chứ *không* tỷ lệ với thể tích. Kết quả thú vị này sẽ khiến cho ta bận rộn rất nhiều.

* *

Một hố đen biến đổi vật chất thành phản vật chất với một hiệu suất nào đó. Thật vậy, một hố đen do vật chất suy sụp tạo thành cũng phát ra phản vật chất. Như vậy ta có thể tìm được sự vi phạm định luật bảo toàn số hạt. Bạn có thể tìm được một thí dụ không?

Câu đố 109 ny

* *

Các hố đen làm lệch ánh sáng. Hiệu ứng này có phụ thuộc vào độ phân cực không? Lực hấp dẫn không làm thay đổi độ phân cực; tuy vậy, nếu ta tính đến các hiệu ứng hạt ảo của QED thì câu chuyện có thể thay đổi. Các tính toán ban đầu hình như cho thấy rằng có một hiệu ứng như vậy, nên lực hấp dẫn có thể tạo ra cầu vồng. Hãy tiếp tục theo dõi vấn đề này.

Xem 143

* *

Nếu các hộp nhẹ làm bằng gương có thể nổi trong bức xạ thì người ta có thể suy ra một hệ quả kỳ dị: hộp đó có thể tự gia tốc trong không gian tự do. Theo một nghĩa nào đó thì một hộp có gia tốc có thể nổi trên bức xạ Fulling–Davies–Unruh mà nó tạo ra bằng gia tốc của riêng nó. Bạn có thể phản bác điều này vì sự khác nhau giữa lực hấp dẫn và gia tốc, cụ thể là sự vắng mặt của hiệu ứng thuỷ triều, tuy nhỏ nhưng đáng kể không? (Những lý do khác như không có gương hoàn hảo cũng làm cho hiệu ứng không thể xảy ra.)

Câu đố 110 ny

* *

Năm 2003, Michael Kuchiev đã đưa ra một tiên đoán thu hút được nhiều sự chú ý là vật chất và bức xạ có bước sóng *lớn hơn* đường kính của một hố đen sẽ bị phản xạ một phần khi chạm vào một hố đen. Bước sóng càng dài, sự phản xạ càng nhiều. Đối với hố đen cỡ ngôi sao hay lớn hơn, ông tiên đoán rằng chỉ có photon hay graviton bị phản xạ. Các hố đen không phải chỉ là một thùng rác. Hiệu ứng này có thật không? Sự bàn luận vẫn đang tiếp diễn.

Xem 144

Cơ học lượng tử của lực hấp dẫn

Chúng ta hãy tiến thêm một bước về mặt nhận thức. Từ trước đến giờ ta đã nhìn Thuyết lượng tử *cùng với* lực hấp dẫn; bây giờ ta đã có khái niệm về Thuyết lượng tử *của* lực hấp dẫn.

Nếu ta còn nhớ tới sự tương tự giữa trường điện từ và 'trường' hấp dẫn thì bước kế tiếp của chúng ta sẽ là tìm ra sự mô tả lượng tử của trường hấp dẫn. Tuy vậy, dù có nhiều nỗ lực của các bậc thông tuệ trong gần một thế kỷ, việc tìm kiếm này vẫn chưa thành công. Thật vậy, các tìm kiếm hiện nay đi theo các hướng khác nhau, như sẽ được giải thích trong phần cuối của cuộc thám hiểm. Nhưng ta hãy cùng nhau tìm hiểu những thành tựu đã đạt được và lý do tại sao các kết quả này vẫn chưa đủ.

Có graviton hay không?

Thuyết lượng tử cho rằng mọi vật chuyển động đều được tạo thành từ các hạt. Loại hạt nào đã tạo thành sóng hấp dẫn? Nếu trường hấp dẫn được nghiên cứu theo kiểu cơ học lượng tử như trường điện từ, thì sóng của nó phải được lượng tử hoá. Nhiều tính chất của lượng tử của lực hấp dẫn có thể suy ra một cách trực tiếp.

Sự phụ thuộc $1/r^2$ của lực hấp dẫn vạn vật, giống như bên Điện học, hàm ý rằng lượng tử của trường hấp dẫn có khối lượng *bằng 0* và chuyển động với tốc độ ánh sáng. Sự độc lập của lực hấp dẫn đối với tác dụng của trường điện từ dẫn tới điện tích *bằng 0*.

Ta đã biết rằng lực hấp dẫn luôn luôn hút chứ không đẩy. Điều này có nghĩa là lượng tử của trường có spin *nguyên* và *chẵn*. Trường hợp spin bằng 0 bị loại bỏ, vì nó hàm ý
Xem 149
không có sự tương tác với năng lượng. Để phù hợp với tính chất 'mọi năng lượng đều có lực hấp dẫn' ta cần có spin $S = 2$. Đúng ra ta có thể chứng minh rằng *chỉ có* sự trao đổi các hạt spin bằng 2, không khối lượng, trong giới hạn cổ điển, mới dẫn tới Thuyết tương đối tổng quát.

Cường độ lực hấp dẫn tương ứng với hằng số cấu trúc tinh tế của Điện từ học, được tính theo công thức

$$\alpha_{G1} = \frac{G}{\hbar c} = 2.2 \cdot 10^{-15}\,\mathrm{kg}^{-2} \quad \text{hay} \quad \alpha_{G2} = \frac{Gmm}{\hbar c} = \left(\frac{m}{m_{Pl}}\right)^2 = \left(\frac{E}{E_{Pl}}\right)^2 . \qquad (48)$$

Tuy vậy, biểu thức đầu tiên không phải là một số thuần tuý; biểu thức sau là số nhưng phụ thuộc vào khối lượng mà ta đưa vào. Các khó khăn này phản ánh một điều là lực hấp dẫn không nói về sự tương tác một cách rõ ràng như trong phần Thuyết tương đối tổng quát. Người ta thường cho rằng nên xem m như là một giá trị tương ứng với năng lượng của hệ mà ta đang nói đến. Đối với đời sống hằng ngày, năng lượng điển hình là 1 eV, đưa tới giá trị $\alpha_{G2} \approx 1/10^{56}$. Thật ra lực hấp dẫn thì yếu so với lực điện từ, có $\alpha_{em} = 1/137.036$.

Nếu tất cả các điều này là đúng, lượng tử trường *ảo* cũng sẽ phải hiện hữu để giải thích cho trường hấp dẫn tĩnh. Tuy vậy cho tới nay, người ta vẫn chưa phát hiện được *graviton* tuy cũng có một chút hy vọng rằng chúng sẽ có. Về mặt thực nghiệm, không ai
Câu đố 111 s
biết cách tạo ra một máy phát hiện graviton. Các bạn hãy thử xem! Về mặt lý thuyết, các bài toán với hằng số tương tác có lẽ đã làm cho người ta không thể xây dựng được một thuyết hấp dẫn *có thể tái chuẩn hoá*; việc không thể tái chuẩn hoá có nghĩa là ta không thể định nghĩa một khai triển nhiễu loạn và như vậy không thể xác định được các hạt, bao gồm graviton. Như vậy có thể là các hệ thức như $E = \hbar\omega$ hay $p = \hbar/2\pi\lambda$ không thể áp dụng cho sóng hấp dẫn. Tóm lại, có lẽ ta phải thay đổi khái niệm hạt trước khi áp dụng Thuyết lượng tử cho lực hấp dẫn. Hiện nay vấn đề này vẫn chưa được giải quyết.

Bọt không-thời gian

Hệ thức bất định cho động lượng và vị trí cũng có thể áp dụng cho trường hấp dẫn. Kết quả là một biểu thức cho sự bất định của tensor metric g trong một vùng có kích thước l, được cho bởi

$$\Delta g \approx 2\frac{{l_{Pl}}^2}{l^2} , \qquad (49)$$

Câu đố 112 ny
trong đó $l_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^3}$ là chiều dài Planck. Bạn có thể suy ra kết quả này không? Thuyết lượng tử chứng tỏ rằng giống như động lượng hay vị trí của một hạt, tensor metric g là một biến động lực *mờ*.

Nhưng chưa hết. Thuyết lượng tử dựa trên nguyên lý phát biểu rằng ta không thể

quan sát thấy các tác dụng nhỏ hơn $\hbar$. Điều này hàm ý rằng các giá trị của biến động lực đối với metric g trong một vùng có kích thước L tuân theo hệ thức

$$g \geqslant \frac{2\hbar G}{c^3} \frac{1}{L^2} . \qquad (50)$$

Bạn có thể chứng minh điều này không? Kết quả này có các hệ quả có thể áp dụng rộng rãi. Giá trị cực tiểu của metric phụ thuộc vào nghịch đảo kích thước của vùng hàm ý rằng ta không thể biết hình dạng của không-thời gian khi kích thước cực nhỏ. Nói cách khác, khi năng lượng cực lớn, khái niệm không-thời gian trở nên mờ. John Wheeler đưa ra thuật ngữ *bọt không-thời gian* để mô tả tình trạng này. Thuật ngữ này khẳng định rằng không-thời gian không liên tục và cũng không phải là một đa tạp trong những vùng như vậy. Nhưng đây lại là nền tảng để ta xây dựng lý thuyết mô tả thiên nhiên từ trước đến giờ! Ta buộc phải nhận rằng sự mô tả thiên nhiên của mình được xây trên cát. Vấn đề này sẽ đóng vai trò trọng yếu trong phần cuối của cuộc hành trình lên đỉnh.

Quyển VI, trang 59

Sự mất điều hợp của không-thời gian

Thuyết tương đối tổng quát cho ta biết rằng trường hấp dẫn và không-thời gian giống nhau. Nếu trường hấp dẫn tiến hoá như một hệ lượng tử, ta có thể thắc mắc tại sao không thấy sự chồng chập của các không-thời gian vĩ mô khác nhau.

Xem 150

Sự bàn luậnđược đơn giản hoá về một trường hợp đơn giản nhất, cụ thể là sự chồng chập trong một vùng chân không kích thước l, của một trường hấp dẫn thuần nhất có giá trị g và một trường có giá trị g'. Giống như trong trường hợp chồng chập các hàm sóng vĩ mô phân biệt, sự chồng chập như vậy sẽ *phân rã*. Đặc biệt, nó phân rã khi các hạt băng qua vùng này. Một tính toán nhỏ cho ta thời gian phân rã là

Quyển IV, trang 148

$$t_{\mathrm{d}} = \left(\frac{2kT}{\pi m}\right)^{3/2} \frac{nl^4}{(g-g')^2} , \qquad (51)$$

trong đó n là mật độ hạt, kT là động năng của chúng và m là khối lượng của chúng. Thay số ta thấy rằng độ thay đổi của cường độ trường hấp dẫn *rất* nhỏ. Đúng ra thì trị số nhỏ đến nỗi ta có thể suy ra là trường hấp dẫn là biến *đầu tiên* hành xử theo kiểu cổ điển trong lịch sử vũ trụ. Hiệu ứng hấp dẫn lượng tử đối với không-thời gian sẽ rất khó phát hiện.

Câu đố 113 e

Tóm lại, vật chất không những cho ta biết độ cong của không-thời gian mà còn cho ta biết hành trạng của chúng nữa.

Thuyết lượng tử là kẻ thù của tiểu thuyết khoa học giả tưởng

Thuyết lượng tử đã làm thay đổi ý tưởng của chúng ta về không-thời gian như thế nào? Cuối thế kỷ 20 đã có nhiều kết quả không mong đợi nhưng thuyết phục trong Lý thuyết hấp dẫn lượng tử bán cổ điển.

Xem 151

Năm 1995 Ford và Roman đã nhận thấy rằng *các lỗ sâu*, khái niệm tưởng tượng trong Thuyết tương đối tổng quát không thể hiện hữu nếu ta tính đến các hiệu ứng lượng tử. Họ đã chứng tỏ rằng các lỗ sâu vĩ mô cần năng lượng âm lớn đến mức không tưởng. (Đối với các lỗ sâu vi mô thì vấn đề còn chưa rõ ràng.)

Xem 152 Năm 1996 Kay, Radzikowski và Wald đã chứng tỏ rằng trong Lý thuyết hấp dẫn lượng tử bán cổ điển không có *các đường cong kiểu thời gian đóng*; như vậy không thể có máy thời gian trong thiên nhiên.

Xem 153 Năm 1997 Pfenning và Ford đã chứng minh rằng *warp drive* (động cơ nhanh hơn ánh sáng), cũng là khái niệm tưởng tượng trong Thuyết tương đối tổng quát, không thể hiện hữu nếu ta tính đến các hiệu ứng lượng tử. Điều đó cũng cần năng lượng âm lớn đến mức không tưởng.

Tóm lại, việc bao gồm các hiệu ứng lượng tử sẽ phá huỷ mọi truyện giả tưởng mà Thuyết tương đối tổng quát đã khơi mào.

Không có chân không đồng nghĩa với không có hạt

Lực hấp dẫn có một hệ quả quan trọng đối với Thuyết lượng tử. Để đếm và xác định các hạt, Thuyết lượng tử cần một trạng thái chân không xác định. Tuy vậy, trạng thái chân Quyển IV, trang 117 không sẽ không xác định khi bán kính cong của không-thời gian thay vì lớn hơn bước sóng Compton lại gần bằng với nó. Trong các không-thời gian có độ cong lớn, ta không thể xác định được hạt. Lý do là ta không thể phân biệt được môi trường với hạt trong các trường hợp sau: sự có mặt của độ cong lớn, chân không đầy vật chất được tạo ra một cách tự phát, như các hố đen đã cho thấy. Bây giờ ta đã biết rằng khi kích thước nhỏ, không-thời gian thăng giáng mãnh liệt; nói cách khác, không-thời gian cong mạnh khi kích thước nhỏ hay khi năng lượng lớn. Nói một cách chặt chẽ, ta không thể định nghĩa hạt; khái niệm hạt chỉ là một sự gần đúng khi năng lượng nhỏ! Ta sẽ tìm hiểu kết luận kỳ lạ này kỹ hơn trong phần cuối của cuộc hành trình.

Tóm tắt về Thuyết lượng tử và lực hấp dẫn

Mọi loại cây đều nói với ta rằng: hằng ngày, các trường hấp dẫn *yếu* đều có thể bao gồm trong Thuyết lượng tử. Trường hấp dẫn *yếu* có tác dụng lên các hàm sóng mà ta có thể đo và tiên đoán được: các hạt lượng tử rơi và phase của chúng thay đổi trong trường hấp dẫn. Ngược lại, việc bao gồm các hiệu ứng lượng tử vào trong Thuyết tương đối tổng quát sẽ dẫn đến bọt không-thời gian, sự chồng chập không-thời gian và các graviton. Việc bao gồm các hiệu ứng lượng tử vào lực hấp dẫn sẽ không cho phép có lỗ sâu, đường cong kiểu thời gian và các vùng năng lượng âm.

Việc bao gồm trường hấp dẫn *mạnh* vào Thuyết lượng tử có thể thành công trong các trường hợp thực tế nhưng lại dẫn tới các vấn đề với khái niệm hạt. Ngược lại, việc bao gồm các hiệu ứng lượng tử vào các trường hợp độ cong không-thời gian lớn sẽ dẫn tới các vấn đề về khái niệm không-thời gian.

Tóm lại, sự kết hợp Thuyết lượng tử và lý thuyết hấp dẫn sẽ dẫn tới các vấn đề về hai khái niệm hạt và không-thời gian. Sự kết hợp Thuyết lượng tử và Thuyết tương đối tổng quát sẽ gặp phải một vấn đề về các nền tảng của việc mô tả thiên nhiên mà ta đã sử dụng từ trước đến nay. Như ta đã thấy trong Hình 89, thiên nhiên thông minh hơn chúng ta nhiều.

Đúng ra cho tới bây giờ ta vẫn giấu đi một sự kiện đơn giản: về mặt khái niệm, Thuyết lượng tử và Thuyết tương đối tổng quát *mâu thuẫn* với nhau. Sự mâu thuẫn này là một trong những lý do ta quay lại với Thuyết tương đối đặc biệt trước khi bắt đầu tìm hiểu Thuyết lượng tử. Bằng cách quay lui ta tránh được nhiều vấn đề vì Thuyết lượng tử không mâu thuẫn với Thuyết tương đối *đặc biệt* mà chỉ mâu thuẫn với Thuyết tương đối



HÌNH 89 Mọi loại cây, như cây baobab Madagascar đẹp đẽ này (Adansonia grandidieri), chứng tỏ rằng thiên nhiên khác với các nhà vật lý, có thể kết hợp Thuyết lượng tử với Lý thuyết hấp dẫn (© Bernard Gagnon).

tổng quát. Các vấn đề này khá căng thẳng vì đã làm thay đổi mọi vật từ nền tảng của Vật lý cổ điển cho tới các thành quả của Thuyết lượng tử. Sẽ có những hệ quả đáng kinh ngạc đối với bản chất của không-thời gian, bản chất của hạt và đối với chính chuyển động. Tuy vậy, trước khi nghiên cứu các đề tài này, ta cần hoàn thành chủ đề hiện tại, phần lượng tử của cuộc thám hiểm, cụ thể là tìm hiểu chuyển động bên trong vật chất và đặc biệt là chuyển động của/trong hạt nhân.

Quyển VI, trang 17



Chương 5

Cấu trúc của hạt nhân – những đám mây đậm đặc nhất

Vật lý hạt nhân được khai sinh vào năm 1896 tại Pháp nhưng hiện nay ít có công trình nghiên cứu. Không còn nhiều đề tài để bàn luận. Nhưng trong thời vàng son của nó, các nhà nghiên cứu đã tìm ra nhiều phương pháp đột phá giúp cho bác sĩ cải thiện mạnh mẽ việc điều trị cho bệnh nhân. Các nhà nghiên cứu cũng khám phá ra lý do các ngôi sao chiếu sáng, nguyên tắc của các loại bom tàn khốc và phương thức mà sự tiến hoá vũ trụ sinh ra các nguyên tử tạo thành chúng ta. Bây giờ ta sẽ tìm hiểu một nhánh hấp dẫn của Vật lý hạt nhân, Vật lý hạt có năng lượng cao.

Xem 154

> “Vật lý hạt nhân chỉ là Vật lý thiên văn mật độ thấp.”
>
> Vô danh

Một kỳ quan của vật lý – Phép chụp ảnh cộng hưởng từ

Người ta có thể cho rằng, công cụ kỳ diệu nhất mà các nhà nghiên cứu vật lý đã tạo ra trong thế kỷ 20 là *Phương pháp chụp ảnh cộng hưởng từ* hay MRI. Kỹ thuật chụp ảnh này cho phép ta ghi lại hình ảnh bên trong cơ thể người với độ phân giải cao mà không làm thương tổn bệnh nhân, khác hẳn việc chụp ảnh bằng tia X. Kỹ thuật này dựa trên các hạt nhân nguyên tử chuyển động. Mặc dù các máy chụp còn đắt tiền – chi phí lên tới nhiều triệu euro – nhưng người ta hy vọng rằng trong tương lai, chúng sẽ rẻ hơn. Máy MRI như ta thấy trong Hình 90, chủ yếu gồm có một cuộn dây lớn, một máy phát vô tuyến và một máy tính. Một số hình ảnh chụp một phần của một người nằm trong cuộn dây được trình bày trong Hình 91. Các hình ảnh này cho phép ta phát hiện các vấn đề về xương, cột sống, hoạt động của tim và các mô. Nhiều người được cứu sống, khoẻ mạnh nhờ các máy này; trong nhiều trường hợp máy cho phép ta chẩn đoán chính xác để chọn cách chữa trị thích hợp cho các bệnh nhân.

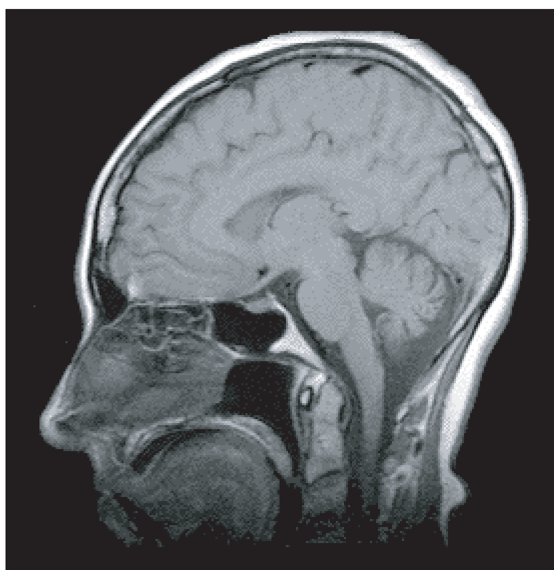
Trong các máy MRI, một máy phát vô tuyến phát ra các sóng được hấp thu vì các hạt nhân hydrogen – proton – là các nam châm nhỏ đang quay. Các nam châm này có thể song song hay đối song với từ trường của cuộn dây. Năng lượng chuyển mức E được hấp thu từ sóng vô tuyến có tần số ω được điều hưởng với từ trường B. Năng lượng được hạt nhân hydrogen hấp thu là

$$E = \hbar\omega = \hbar\gamma B \qquad (52)$$

Hằng số vật liệu $\gamma/2\pi$ có giá trị 42.6 MHz/T đối với hạt nhân hydrogen; nó là kết quả của chuyển động quay của proton. Sự hấp thu sóng vô tuyến là một hiệu ứng lượng tử thuần tuý vì có sự hiện diện của lượng tử tác dụng $\hbar$. Bằng cách sử dụng từ trường một



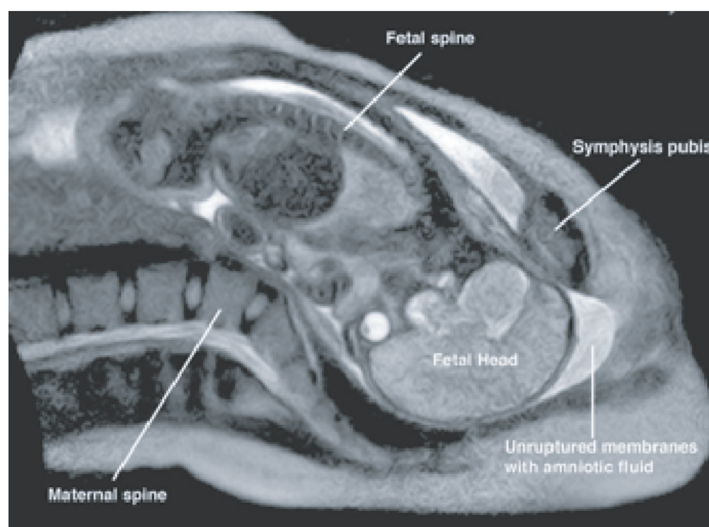
HÌNH 90 Một máy MRI thương mại (© Royal Philips Electronics).





HÌNH 91 Các hình ảnh mặt cắt theo phương thẳng đứng của đầu và xương sống (sử dụng với sự cho phép của Joseph P. Hornak, The Basics of MRI, www.cis.rit.edu/htbooks/mri, Copyright 2003).

cách thông minh, cường độ trong khoảng 0.3 và 7 T cho các máy thương mại và lên tới 21 T cho các máy trong phòng thí nghiệm, người ta có thể đo được độ hấp thu của từng thể tích nguyên tố. Điều thú vị là *mức độ* hấp thu chính xác phụ thuộc vào hạt nhân tạo thành hợp chất nên độ hấp thu sẽ phụ thuộc hoá chất. Khi biểu diễn độ hấp thu theo thang độ xám, một tấm ảnh vẽ lại thành phần các hoá chất khác nhau sẽ được tạo thành. Hình 91 cho ta 2 thí dụ. Nhờ sử dụng thêm vài thủ thuật, máy móc hiện đại có thể vẽ



HÌNH 92 Ảnh của video cộng hưởng từ đầu tiên về sự chào đời của con người (© C. Bamberg).

lại dòng máu trong tim hay luồng khí trong phổi; chúng thường xuyên được sử dụng để Xem 155 tạo ra các hình ảnh của tim đang đập. Một số kỹ thuật khác cho ta thấy các vị trí chuyển hoá đường trong não bộ phụ thuộc vào những điều ta đang nghĩ tới.*

MRI có thể chụp được ảnh các kỳ quan tuyệt hảo của thiên nhiên. Video đầu tiên về Xem 156 sự chào đời của con người, được ghi lại năm 2010 và xuất bản trong năm 2012, như ta thấy trong Hình 92. Các ảnh quét bằng MRI rõ ràng và vô hại đối với trẻ chưa sinh. Ảnh Xem 157 scan của đôi tân nhân trong đêm hợp cẩn đã được Willibrord Weijmar Schultz và cộng sự thực hiện vào năm 1999. Hình này ở Trang 399.

MRI chứng tỏ rằng

▷ Nhiều – nhưng không phải tất cả – hạt nhân nguyên tử có spin.

Giống như mọi vật thể khác, hạt nhân có kích thước, hình dạng, màu sắc, cấu tạo và tương tác. Ta hãy tìm hiểu những điều này.

Kích thước của hạt nhân và sự khám phá hiện tượng phóng xạ

Tín hiệu cộng hưởng từ cho ta thấy hạt nhân hydrogen quay với tốc độ cao nên chúng phải rất nhỏ. Thật vậy, thừa số g của proton được xác định bằng cách sử dụng moment từ μ, khối lượng m và điện tích e, là

$$g = \mu 4 \frac{m}{e\hbar} \approx 5.6 \,. \qquad (53)$$

* Website www.cis.rit.edu/htbooks/mri của Joseph P. Hornak cho ta một giới thiệu tuyệt vời về phép chụp ảnh cộng hưởng từ, bằng tiếng Anh và tiếng Nga, bao gồm kiến thức về Vật lý, cách hoạt động của máy kèm theo nhiều hình ảnh đẹp. Phương pháp nghiên cứu hạt nhân bằng cách đặt chúng vào 2 trường từ và trường vô tuyến đồng thời được gọi là *sự cộng hưởng từ hạt nhân*.


HÌNH 93 Henri Becquerel (1852–1908)


HÌNH 94 Marie Curie (1867–1934)

Giá trị này nhỏ. Sử dụng biểu thức liên hệ g và bán kính của một vật phức hợp ta suy ra bán kính của proton khoảng 0.9 fm; giá trị này được khẳng định qua nhiều thí nghiệm và nhiều phương pháp đo khác. Proton nhỏ hơn nguyên tử hydrogen, có bán kính khoảng 30 pm, gần 30 000 lần. Proton nhỏ nhất trong mọi hạt nhân; hạt nhân lớn nhất mà ta đã biết có bán kính khoảng 7 lần như vậy.

Quyển IV, trang 108

Hạt nhân có kích thước nhỏ không phải là điều mới lạ. Người ta đã biết điều này từ đầu thế kỷ 20. Câu chuyện bắt đầu từ 1/3/1896, khi Henri Becquerel* phát hiện một hiện tượng kỳ lạ: khoáng chất uranium potassium sulphate làm đen kính ảnh. Becquerel đã biết rằng chất này là chất huỳnh quang mạnh; ông đã giả định rằng sự phát huỳnh quang này có liên hệ với tia X mà Conrad Röntgen đã khám phá trong năm trước đó. Giả định này sai; tuy vậy nó đưa ông tới một khám phá mới quan trọng. Khi tìm hiểu lý do cho sự tác dụng của uranium lên kính ảnh, Becquerel thấy rằng các khoáng chất này phát ra một loại bức xạ mà vào thời đó người ta chưa biết tới; thêm nữa, bức xạ này do một chất chứa uranium phát ra. Năm 1898, Gustave Bémont đặt tên cho tính chất này là *tính phóng xạ*.

Các tia phóng xạ cũng được nhiều nguyên tố khác uranium phát ra. Các bức xạ này có thể 'thấy được': người ta có thể phát hiện ra nó nhờ các chớp sáng nhỏ xuất hiện khi chúng chạm vào màn hình nhấp nháy. Các chớp sáng này rất bé ngay cả khi khoảng cách

* Henri Becquerel (b. 1852 Paris, d. 1908 Le Croisic), vật lý gia nổi tiếng; công trình nghiên cứu chính của ông thuộc về phóng xạ. Ông là giáo sư hướng dẫn cho Marie Curie, vợ của Pierre Curie và là nhân vật chính đưa bà lên đài danh vọng. Đơn vị SI của độ phóng xạ được đặt tên là Becquerel. Nhờ khám phá về phóng xạ ông đã nhận được giải Nobel vật lý năm 1903 cùng với gia đình Curies.

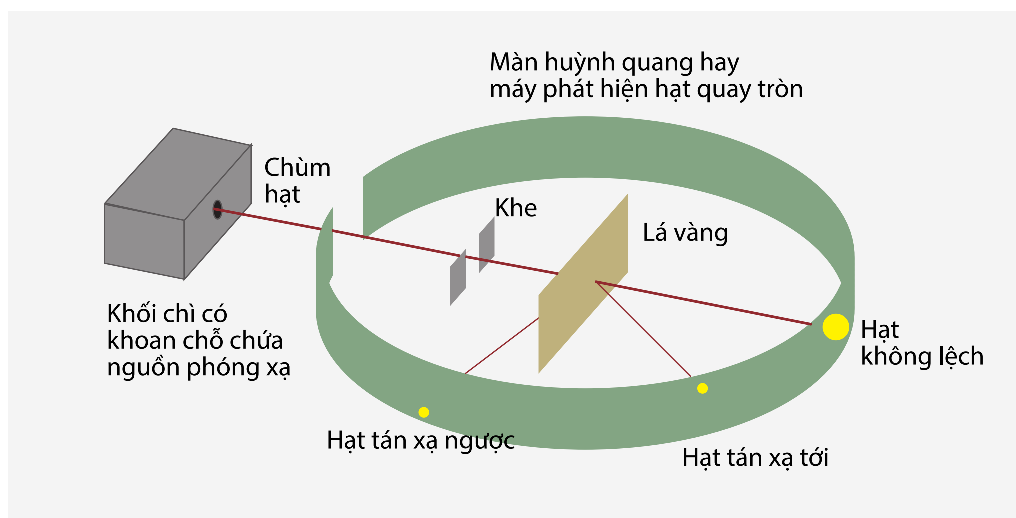
BẢNG 11 Các loại phóng xạ và tia chính do vật chất phát ra.

Loại	Hạt	Thí dụ	Tầm truyền	Tác hại	Vật che chắn	Công dụng
Tia α 3 tới 10 MeV	hạt nhân helium	^{235}U, ^{238}U, ^{238}Pu, ^{238}Pu, ^{241}Am	vài cm trong không khí	khi được ăn, hít hay chạm vào	vật liệu bất kỳ như giấy	đo độ dầy
Tia β 0 tới 5 MeV	electron và	^{14}C, ^{40}K, ^{3}H, ^{101}Tc	< 1 mm trong kim loại	nhiều	kim loại	chữa ung thư
	antineu-trino		năm ánh sáng	không	không	nghiên cứu
Tia β^{+}	positron và	^{40}K, ^{11}C, ^{11}C, ^{13}N, ^{15}O	nhỏ hơn β	trung bình	vật liệu bất kỳ	chụp ảnh cắt lớp
	neutrino		nhiều năm ánh sáng	không	không	nghiên cứu
Tia γ	photon năng lượng cao	^{110}Ag	nhiều m trong không khí	cao	chì dày	bảo quản dược thảo, khử trùng
Phản ứng n *c.* 1 MeV	neutron	^{252}Cf, Po-Li (α,n), ^{38}Cl-Be (γ,n)	nhiều m trong không khí	cao	0.3 m paraffin	máy phát điện hạt nhân, thí nghiệm về hấp dẫn lượng tử
Phát xạ n typ. 40 MeV	neutron	^{9}He, ^{24}N, ^{254}Cf	nhiều m trong không khí	cao	0.3 m paraffin	thí nghiệm nghiên cứu
Phát xạ p typ. 20 MeV	proton	^{5}Be, ^{161}Re	như tia α	ít	chất rắn	
Phân hạch tự phát typ. 100 MeV	hạt nhân	^{232}Cm, ^{263}Rf	như tia α	ít	chất rắn	phát hiện nguyên tố mới

tới nguồn phát dài nhiều mét; như vậy các tia này phải được các nguồn điểm phát ra. Tóm lại, tia phóng xạ phải được phát ra từ các nguyên tử đơn lẻ và điều đó khẳng định sự hiện hữu của nguyên tử. Đúng ra sự phóng xạ còn cho phép ta *đếm* các nguyên tử: trong một chất phóng xạ loãng, ta có thể đếm được các chớp sáng nhờ một máy ảnh hay một hệ đếm photon.

Quyển IV, trang 43

Cường độ phóng xạ không chịu ảnh hưởng của điện từ trường và không phụ thuộc nhiệt độ hay sự chiếu sáng. Tóm lại, phóng xạ không phụ thuộc hay liên hệ với điện từ

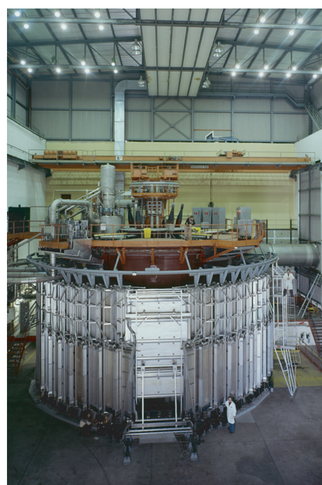


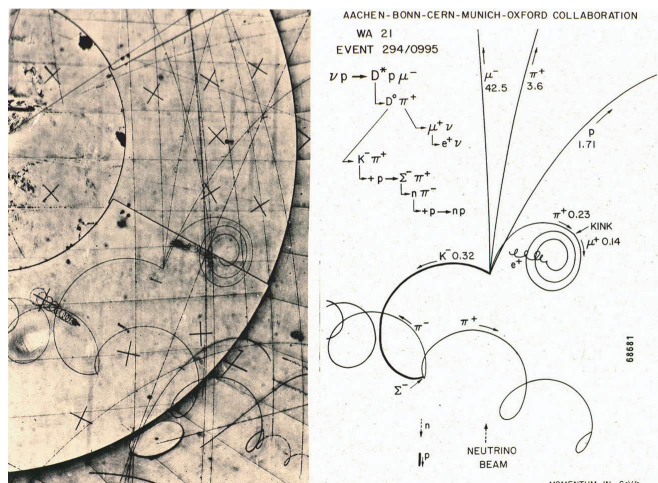
HÌNH 95 Sơ đồ thí nghiệm tán xạ Rutherford–Geiger. Lá vàng có kích thước khoảng 1 cm vuông.

trường. Năng lượng cao của các tia phóng xạ cũng không giải thích được bằng các hiệu ứng điện từ. Sự phóng xạ phải bắt nguồn từ một loại lực mới khác. Đúng ra người ta phải mất 30 năm và hàng tá giải Nobel để hiểu rõ hiện tượng này. Hoá ra có nhiều loại phóng xạ; các tia khác nhau sẽ hành xử khác nhau khi chúng bay qua từ trường hay khi gặp vật chất. Các loại bức xạ được liệt kê trong Bảng 11. Đồng thời các tia này đã được nghiên cứu tường tận với mục đích tìm hiểu bản chất của thực thể được phát ra và sự tương tác của chúng với vật chất.

Năm 1909, hiện tượng phóng xạ đã tạo niềm hứng khởi cho vật lý gia 37 tuổi Ernest Rutherford,* người đã đoạt giải Nobel trước đó một năm, hướng tới một trong những thí nghiệm thông minh của ông. Ông đã yêu cầu người cộng sự là Hans Geiger lấy một máy phát tia α – một loại tia phóng xạ mà Rutherford đã nhận diện và đặt tên cách đó 10 năm – hướng vào một lá vàng mỏng. Cuộc nghiên cứu nhằm mục đích tìm ra nơi tia α sẽ kết thúc. Thí nghiệm được trình bày trong Hình 95. Nhóm nghiên cứu dò theo đường đi của các hạt bằng cách sử dụng màn hình nhấp nháy; sau này họ sử dụng một phát minh của Charles Wilson: buồng sương. Một *buồng sương*, giống như các tiền thân của nó, buồng bọt, tạo ra các vệt trắng dọc theo đường đi của các điện tích; cơ chế này giống như cơ chế tạo ra các vệt mây trắng trên bầu trời sau các phi cơ. Cả 2 loại buồng đều cho phép ta *nhìn thấy* tia phóng xạ như trong Hình 96.

* Ernest Rutherford (b. 1871 Brightwater, d. 1937 Cambridge), vật lý gia nổi tiếng. Ông di cư sang Anh và trở thành giáo sư đại học Manchester. Ông đặt ra các thuật ngữ hạt α, β, proton và neutron. Là một nhà thực nghiệm tài ba, ông đã khám phá ra là sự phóng xạ đã biến đổi các nguyên tố, giải thích bản chất của tia α, khám phá hạt nhân, đo kích thước hạt nhân và thực hiện các phản ứng hạt nhân đầu tiên. Điều trớ trêu là ông nhận giải Nobel hoá học năm 1908 làm cho ông và cộng đồng vật lý cảm thấy buồn cười vì sự khám phá chưa đủ điều kiện để trao giải so với nhiều nhà phát minh khác vào thời đó. Ông đã đặt nền tảng cho một học viện nghiên cứu vật lý hạt nhân và nhiều vật lý gia nổi tiếng đã xuất thân từ viện đó. Vì là một nhà thực nghiệm nên Rutherford thiếu thiện cảm với Thuyết lượng tử mặc dù nó giải thích cho các khám phá của ông một cách hợp lý nhất.

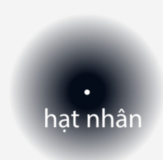




HÌNH 96 'Buồng bọt Đại Âu' – loại lớn nhất trong các buồng đã xây dựng – và các vệt do các hạt tương đối tính tạo ra, cùng với giá trị động lượng suy ra từ ảnh chụp (© CERN).

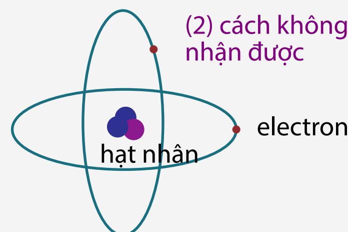
Minh hoạ nguyên tử tự do ở trạng thái cơ bản

(1) cách chấp nhận được



Đúng: đám mây electron hình cầu nhoè
Sai: hạt nhân và electron không có màu, hạt nhân quá lớn

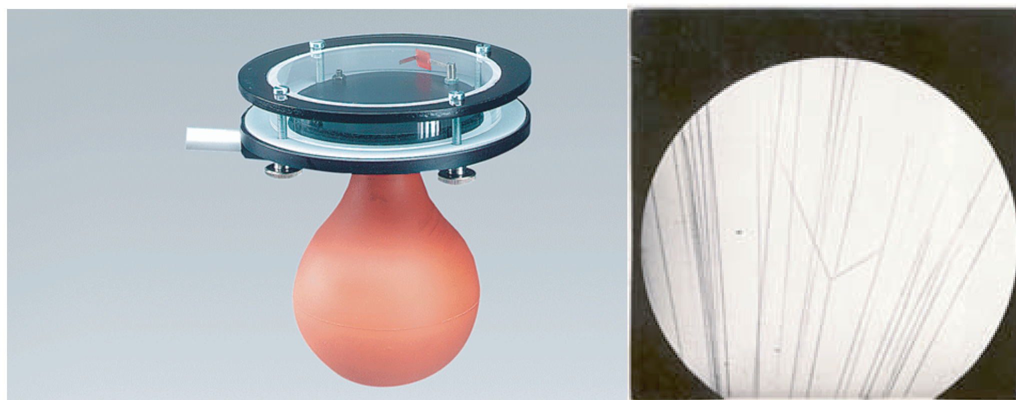
(2) cách không chấp nhận được



Đúng: hầu như không có gì!
Sai: hạt nhân nhỏ hơn nguyên tử hàng trăm ngàn lần, electron không chuyển động trên các quỹ đạo, electron không được mở rộng, nguyên tử không phẳng mà hình cầu, nguyên tử và hạt nhân không có ranh giới rõ rệt, không hạt nào có màu

HÌNH 97 Một minh hoạ thực tế hợp lý (hình bên trái) và một minh hoạ sai của nguyên tử (hình bên phải) thường gặp trong sách giáo khoa. Nguyên tử ở trạng thái cơ bản là những đám mây electron hình cầu với nhân tí hon, cũng là một đám mây, ở trung tâm. Các nguyên tử tương tác, các nguyên tử liên kết hoá học và một số, nhưng không phải tất cả, các nguyên tử kích thích có đám mây electron có hình dạng khác nhau.

Các máy phát hiện bức xạ quanh lá vàng mỏng ghi lại kết quả kỳ lạ nhưng nhất quán: phần lớn các hạt α xuyên thẳng qua lá vàng, trong khi chỉ có vài hạt bị tán xạ hay phản xạ. Thêm nữa, những hạt này không bị phản xạ tại mặt lá vàng mà bị phản xạ từ bên trong. Câu đố 114 s (Bạn có thể hình dung ra cách giải thích cho điều này không?) Rutherford và Geiger suy



HÌNH 98 Hình bên trái: một buồng sương Wilson hiện đại, đường kính khoảng 100 mm. Hình bên phải: một trong những hình đầu tiên của các tia α do Patrick Blackett chụp bằng buồng sương trong thập kỷ 1920, cho thấy một va chạm với nguyên tử trong buồng sương (© Wiemann Lehrmittel, Royal Society)

ra từ kết quả thí nghiệm tán xạ, trước tiên là các nguyên tử trong lá kim loại gần như trong suốt. Chỉ có tính trong suốt của các nguyên tử mới giải thích được lý do phần lớn các hạt α đi qua lá kim loại mà không lệch mặc dù chiều dày của lá là trên 2000 nguyên tử. Nhưng một số hạt lại bị tán xạ dưới một góc lớn hay bị phản xạ. Rutherford chứng tỏ rằng sự phản xạ phải bắt nguồn từ một điểm tán xạ. Bằng cách đếm các hạt bị phản xạ (khoảng 1/20000 đối với lá vàng dày 0.4 µm), Rutherford đã có thể suy ra *kích thước* của thực thể gây ra phản xạ và ước tính *khối lượng* của nó. (Tính toán này hiện nay là một bài tập cơ bản trong bài học Vật lý ở trường đại học). Ông nhận thấy rằng trong thực tế, thực thể phản xạ chứa toàn thể khối lượng nguyên tử trong đường kính vài fm. Rutherford gọi khối lượng tập trung này là *hạt nhân* nguyên tử.

Sử dụng kiến thức về nguyên tử, từ thí nghiệm này, Rutherford suy ra nguyên tử gồm có một đám mây electron xác định kích thước của các nguyên tử – vào cỡ 0.1 nm – và một hạt nhân nhỏ nhưng nặng ở trung tâm. Nếu một nguyên tử có kích thước bằng một quả bóng rổ thì hạt nhân của nó có kích thước của một hạt bụi nhưng chứa tới 99.9 % khối lượng quả bóng. Vậy

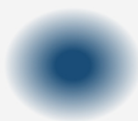
▷ Nguyên tử giống như một đám kẹo bông gòn bao quanh một hạt bụi nặng.

Mặc dù kẹo bông gòn – đám mây electron – bao quanh hạt nhân cực kỳ mỏng và nhẹ, nó cũng đủ mạnh để không cho hai nguyên tử xuyên qua nhau. Trong chất rắn, kẹo bông gòn, tức đám mây electron, giữ cho hai hạt nhân lân cận cách nhau một khoảng không đổi. Hình 97 cho ta các cách, đúng nhiều và ít đúng hơn, hình dung ra một nguyên tử. Kẹo bông gòn giải thích cho thí nghiệm Rutherford–Geiger: đối với hạt α nhỏ và nặng, thì kẹo bông gòn chủ yếu là không gian rỗng nên hạt bay qua các đám mây electron cho đến khi chúng ra khỏi lá vàng hay chạm vào một hạt nhân.

Mật độ hạt nhân khá ấn tượng: khoảng $5.5 \cdot 10^{17}$ kg/m^3. Với mật độ này, khối lượng quả đất sẽ vừa vặn trong một hình cầu có bán kính 137 m và một hạt cát sẽ có khối lượng lớn hơn tàu chở dầu lớn nhất. (Bạn có thể chứng minh điều này không?) Câu đố 115 e

Minh hoạ một hạt nhân nguyên tử

1/ Cách chấp nhận được



Đúng: hạt nhân có hình dạng ellipsoid nhoè

Sai: hạt nhân không có màu, một số hạt nhân có hình dạng khác

2/ Cách không chấp nhận được



Đúng: cấu tạo

Sai: nuleon không có vị trí cố định đối với nhau, không có ranh giới rõ rệt, không có màu

HÌNH 99 Một minh hoạ hạt nhân hợp với thực tế (hình bên trái) và một minh hoạ hạt nhân sai (hình bên phải) thường gặp trong sách giáo khoa. Hạt nhân là các đám mây nucleon hình cầu.

> “Bây giờ tôi đã biết một nguyên tử trông như thế nào rồi!”
>
> Ernest Rutherford

Hạt nhân có cấu tạo phức hợp

MRI cũng cho ta thấy rằng hạt nhân *có cấu tạo phức hợp*. Thật vậy, ta có thể chụp ảnh bằng cách sử dụng các hạt nhân nặng hơn hydrogen, như hạt nhân fluor hay oxygen. Các thừa số g của các hạt nhân này không bằng 2 là trị đặc trưng của các chất điểm; hạt nhân càng nặng thì sự sai biệt càng nhiều. Do đó mọi hạt nhân đều có kích thước hữu hạn. Ta có thể đo được kích thước hạt nhân; thí nghiệm Rutherford–Geiger và nhiều thí nghiệm tán xạ khác cho phép làm việc này. Các giá trị đo được đã khẳng định các giá trị được tiên đoán bằng thừa số g. Tóm lại, cả giá trị của g lẫn kích thước khác không đều chứng tỏ rằng *hạt nhân có cấu tạo phức hợp.*

Quyển IV, trang 108

Điều thú vị ở chỗ, ý tưởng hạt nhân có cấu tạo phức hợp thì xưa cũ hơn chính khái niệm hạt nhân. Năm 1815, sau những phép đo khối lượng nguyên tử đầu tiên của John Dalton và những người khác, các nhà nghiên cứu nhận thấy rằng khối lượng của các nguyên tố hoá học khác nhau gần như là các bội chính xác của khối lượng nguyên tử hydrogen. William Prout đã đưa ra giả thuyết mọi nguyên tố đều được cấu tạo từ hydrogen. Khi hạt nhân được khám phá là nó chứa gần như toàn bộ khối lượng nguyên tử, người ta nghĩ rằng mọi hạt nhân đều được tạo ra từ hạt nhân hydrogen. Đứng đầu danh sách các cấu tử, hạt nhân hydrogen được đặt tên là *proton*, từ tiếng Hy Lạp ‘đầu tiên’ đồng thời gợi nhớ tên của Prout. Proton mang điện tích bằng điện tích của electron nhưng trái dấu còn khối lượng thì nặng hơn khối lượng electron 1836 lần. Thông tin chi tiết của proton được liệt kê trong Bảng 12.

Tuy vậy bội của điện tích và bội của khối lượng không khớp với nhau. Tính trung bình, một hạt nhân có n proton, có khối lượng khoảng 2.6 n lần khối lượng proton.

BẢNG 12 Tính chất của nucleon: proton và neutron (nguồn: pdg.web.cern.ch).

Tính chất	Proton	Neutron
Khối lượng	$1.672\,621\,777(74) \cdot 10^{-27}$ kg	$1.674\,927\,351(74) \cdot 10^{-27}$ kg
	0.150 327 7484(66) nJ	0.150 534 9631(66) nJ
	938, 272 046(21) MeV	939, 565 379(21) MeV
	1.007 276 466 812(90) u	1.008 664 916 00(43) u
	$1836.152\,6675(39) \cdot m_e$	$1838.683\,6605(11) \cdot m_e$
Spin	1/2	1/2
Tính chẵn lẻ P	+1	+1
Phản hạt	antiproton $\overline{p}$	antineutron $\overline{n}$
Phân lượng Quark	uud	udd
Điện tích	1 e	0
Bán kính điện tích	0.88(1) fm	$0.12(1)\,fm^2$
Moment lưỡng cực điện	$< 5.4 \cdot 10^{-26}$ e · m	$< 2.9 \cdot 10^{-28}$ e · m
Độ phân cực điện	$1.20(6) \cdot 10^{-3}\,fm^3$	$1.16(15) \cdot 10^{-3}\,fm^3$
Moment từ	$1.410\,606\,743(33) \cdot 10^{-26}$ J/T	$-0.966\,236\,47(23) \cdot 10^{-26}$ J/T
Thừa số g	5.585 694 713(46)	−3.826 085 45(90)
	$2.792\,847\,356\,(23) \cdot \mu_N$	$-1.913\,042\,72(45) \cdot \mu_N$
Tỷ số hồi chuyển từ	0.267 522 2005(63) 1/nsT	
Độ phân cực từ	$1.9(5) \cdot 10^{-4}\,fm^3$	$3.7(2.0) \cdot 10^{-4}\,fm^3$
Thời gian sống trung bình (hạt tự do)	$> 2.1 \cdot 10^{29}$ a	880.1(1.1) s
Hình dạng (moment tứ cực)	dẹt	dẹt
Các trạng thái kích thích	>10	>10

Các thí nghiệm bổ sung đã khẳng định ý tưởng của Werner Heisenberg: mọi hạt nhân nặng hơn hạt nhân hydrogen được tạo thành từ *proton* mang điện tích dương và *neutron* không mang điện. Neutron là các hạt hơi nặng hơn proton (độ sai biệt nhỏ hơn 1/700, như ta thấy trong Bảng 12), nhưng không mang điện. Vì khối lượng của chúng gần giống nhau, khối lượng của hạt nhân – tức là của nguyên tử – (gần như) là bội số nguyên của khối lượng proton. Nhưng vì neutron trung hoà nên số khối lượng và số điện tích khác nhau. Vì trung hoà nên neutron không để lại dấu vết trong các buồng sương và khó bị phát hiện hơn proton, các hadron hay lepton mang điện. Vì lý do này, neutron được khám phá trễ hơn các hạt hạ nguyên tử ngoại lai khác.

Ngày nay người ta có thể treo lơ lửng các neutron đơn lẻ giữa các cuộn dây có hình

dạng thích hợp nhờ sự giúp đỡ của các 'cửa sổ' teflon. Các bẫy như vậy đã được Wolfgang Paul giới thiệu vào năm 1951. Chúng hoạt động được vì neutron, dù không mang điện, nhưng có một moment từ nhỏ. (Điều này hàm ý neutron là một phức hợp của các hạt mang điện.) Nếu ta khéo léo điều chỉnh từ trường, neutron sẽ yên vị, hay nói cách khác, chúng lơ lửng. Điều hiển nhiên là bẫy này chỉ có ý nghĩa nếu ta quan sát được các hạt bị bẫy. Trong trường hợp của neutron ta làm được điều này nhờ sóng vô tuyến được hấp thu khi moment từ đổi hướng đối với từ trường ngoài. Kết quả thí nghiệm khá đơn giản: thời gian sống của neutron tự do là 885.7(8) s. Tuy vậy ai cũng biết rằng bên trong nhiều hạt nhân tạo thành chúng ta, neutron không phân rã trong thời gian hàng triệu năm vì sản phẩm phân rã không dẫn tới một trạng thái có năng lượng thấp hơn. (Tại sao như Câu đố 116 s vậy?)

MRI cũng cho ta thấy nhiều nguyên tố có các loại nguyên tử khác nhau. Các nguyên tố này có các nguyên tử có cùng số proton nhưng có số neutron khác nhau. Ta nói các nguyên tố này có nhiều *đồng vị*.* Kết quả này cũng giải thích lý do nhiều nguyên tố phát xạ theo kiểu hoà trộn các thời gian phân rã khác nhau. Mặc dù các đồng vị hoá học (gần như) không thể phân biệt được, chúng vẫn có các tính chất hạt nhân khác hẳn nhau. Nhiều nguyên tố như thiếc, caesium, polonium, có trên 30 đồng vị. Như vậy 118 nguyên tố đã biết có trên 2000 đồng vị. Chúng được trình bày trong Hình 100. (Các đồng vị không có electron tức là hạt nhân chỉ có neutron và proton, được gọi là: *nuclide*.)

Vì hạt nhân cực kỳ đậm đặc chứa nhiều proton mang điện dương nên phải có một lực giữ cho mọi hạt sống chung, chống lại lực đẩy tĩnh điện. Ta đã thấy rằng lực này không bị ảnh hưởng bởi trường điện từ hay trường hấp dẫn; nó phải là một cái gì khác. Lực này phải có tầm ngắn nếu không các hạt nhân sẽ phân rã do phát ra các tia α có năng lượng Trang 220 cao. Lực này được gọi là *lực tương tác hạt nhân mạnh*. Ta sẽ nghiên cứu kỹ lực này sau.

Lực tương tác hạt nhân mạnh liên kết proton và neutron trong hạt nhân. Chủ yếu ta cần nhắc lại rằng bên trong hạt nhân, proton và neutron – thường được gọi chung là các *nucleon* – chuyển động theo một cách tương tự như electron chuyển động trong nguyên tử. Hình 99 minh hoạ cho điều này. Chuyển động của proton và neutron bên trong hạt nhân cho phép ta tìm hiểu hình dạng, spin và moment từ hạt nhân.

Kẻ độc hành hạt nhân – các tia vũ trụ

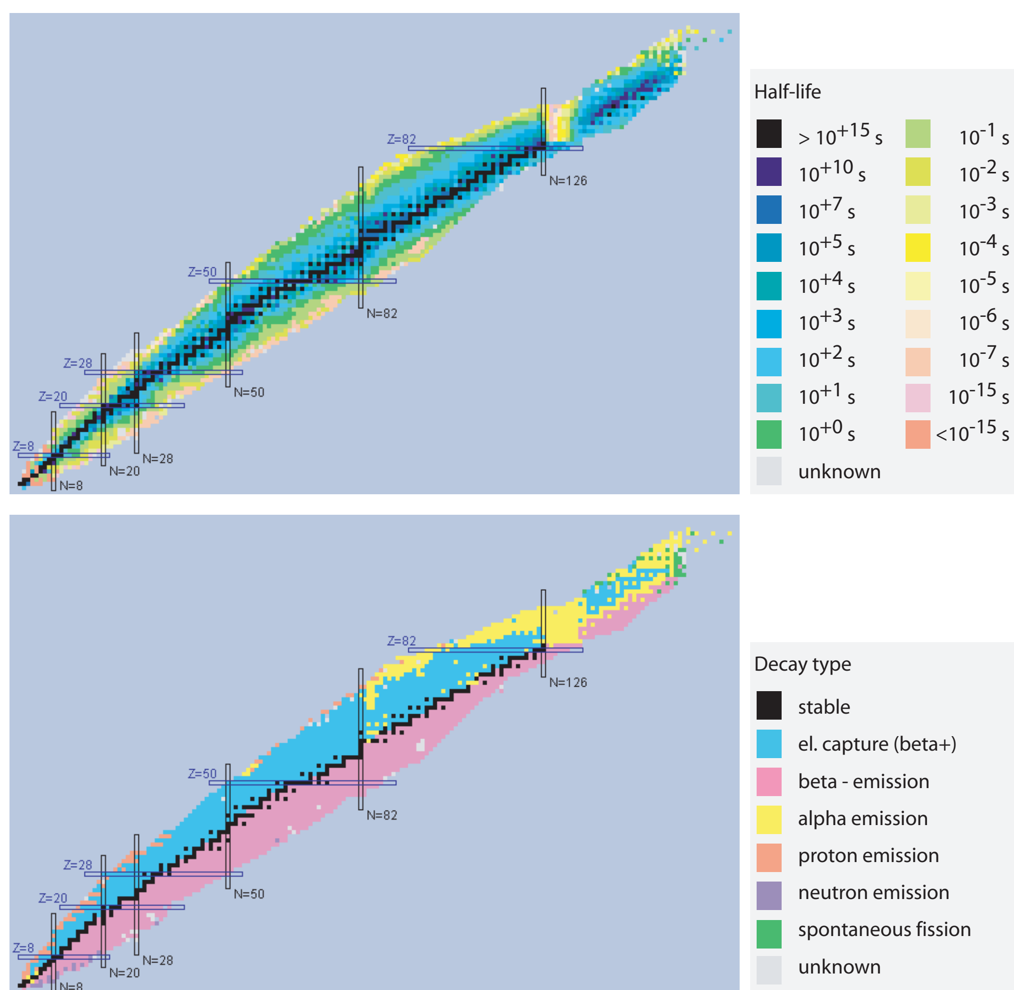
Trong đời sống hằng ngày, hạt nhân được tìm thấy bên trong các nguyên tử. Nhưng trong một số trường hợp, chúng chuyển động mà không có đám mây electron bao quanh. Đầu tiên là khám phá của Rutherford; bằng một thí nghiệm thông minh ông đã chứng tỏ rằng các hạt α do các chất phóng xạ phát ra là các hạt nhân helium. Giống như các hạt nhân khác, hạt α nhỏ nên rất có ích khi sử dụng làm đạn tử.

Năm 1912, Viktor Heß** có một khám phá hoàn toàn không mong đợi. Heß bị lôi cuốn vì một tĩnh điện nghiệm (còn được gọi là điện kế). Đây là một máy phát hiện điện

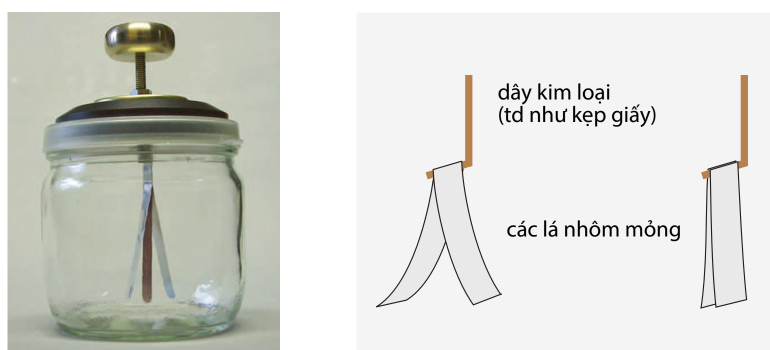
Quyển III, trang 23

* Tên này dẫn xuất từ những chữ Hy Lạp là 'giống nhau' và 'điểm', vì các nguyên tử ở cùng một điểm trên Bảng phân loại tuần hoàn các nguyên tố.

** Viktor Franz Heß, (b. 1883 Waldstein, d. 1964 Mount Vernon), nhà vật lý hạt nhân, nhận giải Nobel vật lý 1936 nhờ khám phá tia vũ trụ. Heß là một trong các nhà tiên phong nghiên cứu sự phóng xạ. Khám phá của Heß' cũng giải thích cho việc khí quyển luôn luôn bị tích điện ít hay nhiều, một kết quả quan trọng đối với việc hình thành và hành trạng của các đám mây. Hai mươi năm sau khám phá tia vũ trụ, năm 1932 Carl Anderson khám phá phản hạt đầu tiên, positron, trong tia vũ trụ; năm 1937 Seth Neddermeyer và Carl Anderson khám phá muon; năm 1947 một nhóm khoa học gia do Cecil Powell đứng đầu khám phá pion;



HÌNH 100 Mọi nuclide đã biết có chu kỳ bán rã (ở trên) và các kiểu phân rã chính (bên dưới). Dữ liệu lấy từ www.nndc.bnl.gov/nudat2.



HÌNH 101 Một điện nghiệm (hay điện kế) (© Harald Chmela) và trạng thái tích điện (hình giữa) và không tích điện (hình bên phải).

năm 1951, Λ^0 và kaon K^0 được khám phá. Mọi khám phá này đều sử dụng tia vũ trụ và phần lớn dẫn tới



HÌNH 102 Viktor Heß (1883–1964)

tích đơn giản nhất. Chúng gồm 2 dải kim loại mỏng, thường là các miếng nhôm bọc chocolate, được treo lên. Khi điện nghiệm tích điện, hai lá kim loại đẩy nhau và tách ra, như trong Hình 101. (Bạn có thể tự làm một cái bằng cách dùng nhựa trong làm nắp một cái ly không và treo lên đó một kẹp giấy và các dải bằng nhôm. Bạn có thể tích điện cho điện nghiệm bằng cách sử dụng bong bóng cao su và áo len.) Điện nghiệm đo được điện tích. Giống nhiều người đi trước ông, Heß nhận thấy dù điện nghiệm hoàn toàn bị cô lập, sau một thời gian điện tích vẫn biến mất. Ông thắc mắc: tại sao? Bằng cách suy nghĩ kỹ càng ông loại dần các giải thích cho đến khi chỉ còn một khả năng: sự phóng điện do các tia có mang điện giống các tia mới được phát hiện trong hiện tượng phóng xạ, phát ra từ môi trường xung quanh. Để tăng khoảng cách tới môi trường, Heß chuẩn bị một điện kế nhạy và mang nó lên một khinh khí cầu.

Câu đố 117 e

Khí cầu cũng chứng tỏ rằng khi lên cao thì sự phóng điện cũng giảm như mong đợi do khoảng cách tới các nguồn phóng xạ trên mặt đất tăng lên. Nhưng trên 1000 m, sự phóng điện lại gia tăng, và càng lên cao hiện tượng càng mạnh. Liều mạng, ông tiếp tục lên cao hơn 5000 m; sự phóng điện nhanh hơn trên mặt đất gấp nhiều lần. Kết quả này phù hợp với sự kiện bức xạ tới từ vũ trụ và bị khí quyển hấp thu. Trong một chuyến bay quan trọng nhất, được thực hiện khi có nhật thực (gần toàn phần), Heß chứng tỏ rằng phần lớn các 'bức xạ trên cao' không tới từ Mặt trời mà ở xa hơn. Ông gọi bức xạ này là *tia vũ trụ*. Người ta cũng nói về *bức xạ vũ trụ*. Trong các thế kỷ cuối, nhiều người đã nhậu bằng một cái ly và ăn chocolate bọc giấy nhôm; nhưng chỉ có Heß kết hợp các sự kiện cùng với sự quan sát và suy diễn chặt chẽ để kiếm được giải Nobel.*

Ngày nay, các máy phát hiện tia vũ trụ thông thường nhất là các *máy đếm Geiger–Müller* và *buồng tia lửa điện*. Cả hai đều dựa trên cùng một nguyên tắc; một hiệu thế cao tác dụng lên hai phần kim loại nằm trong một lớp khí mỏng, thích hợp (một dây kim loại và một lưới hình trụ đối với máy đếm Geiger-Müller, hai bản hay hai lưới dây điện trong buồng tia lửa). Khi một ion có năng lượng lớn bay qua máy đếm, một tia lửa được tạo ra và ta có thể nhìn thấy trực tiếp (bạn có thể chứng kiến điều này khi nhìn buồng tia lửa nơi tiền sảnh của CERN), hay phát hiện nó nhờ dòng điện phát sinh. Trước kia, dòng điện được khuếch đại rồi gởi tới một cái loa nên ta có thể nghe được một tiếng 'click' của hạt. Tóm lại, với một máy Geiger ta không thể thấy ion hay hạt nhưng có thể nghe thấy chúng. Sau này, nhờ các tiến bộ trong lĩnh vực điện tử, ta có thể đếm được các hạt hay nguyên tử bị ion hoá.

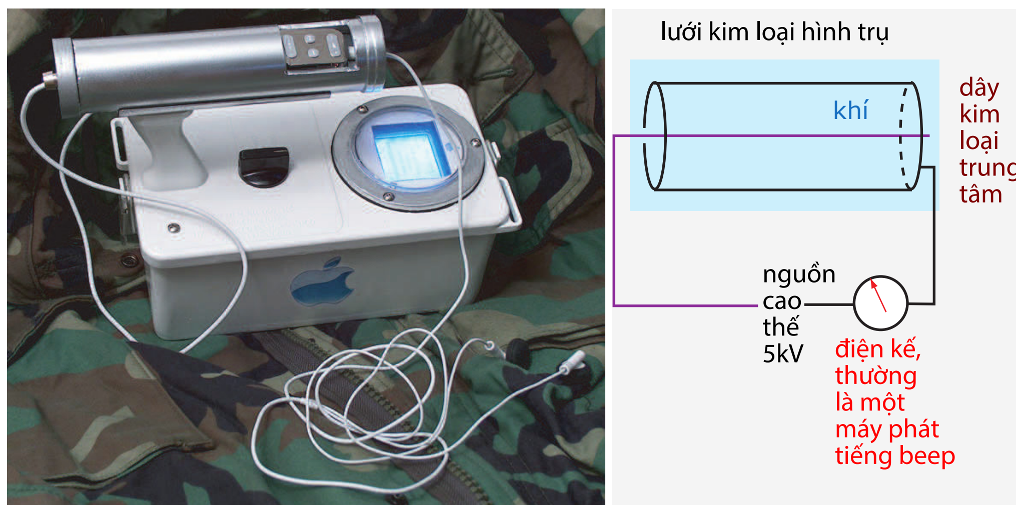
giải Nobel.
* Đúng ra Hess đã sử dụng lá vàng trong điện kế thay vì lá nhôm.

BẢNG 13 Các loại bức xạ chính của vũ trụ.

Hạt	Năng lượng	Nguồn gốc	Máy phát hiện	Vật chắn
Ở trên cao, các hạt sơ cấp:				
Proton (90 %)	10^9 tới 10^{22} eV	ngôi sao, siêu tân tinh, ngoại thiên hà, không rõ	chất nhấp nháy	trong hầm mỏ
Tia α (9 %)	typ. $5 \cdot 10^6$ eV	ngôi sao, thiên hà	ZnS, máy đếm	1 mm chất bất kỳ
Các hạt nhân khác như Le, Be, B, Fe (1 %)	10^9 tới 10^{19} eV	ngôi sao, tân tinh	máy đếm, film	1 mm chất bất kỳ
Neutrino	MeV, GeV	Mặt trời, ngôi sao	chlor, gallium, nước	không có
Electron (0.1 %)	10^6 tới $> 10^{12}$ eV	tàn dư của siêu tân tinh		
Gamma (10^{-6})	1 eV tới 50 TeV	ngôi sao, pulsar, thiên hà, ngoại thiên hà	máy phát hiện bán dẫn	trong hầm mỏ
Ở mực nước biển, các hạt thứ cấp sinh ra trong khí quyển:				
Muon	3 GeV, $150/\text{m}^2\text{s}$	proton chạm vào khí quyển, sinh ra pion phân rã thành muon	buồng trôi, buồng bọt, máy dò nhấp nháy	15 m nước hay 2.5 m đất
Oxygen, carbon phóng xạ và các hạt nhân khác	thay đổi	thí dụ $n + {}^{16}\text{O} \rightarrow \text{p} + {}^{14}\text{C}$	máy đếm	đất
Positron	thay đổi		máy đếm	đất
Neutron	thay đổi	sản phẩm phản ứng khi proton đụng hạt nhân ^{16}O	máy đếm	đất
Pion	thay đổi	sản phẩm phản ứng khi proton đụng hạt nhân ^{16}O	máy đếm	đất

Ngoài ra còn có các chùm hạt sơ cấp bị làm chậm.

Việc tìm hỗn hợp khí thích hợp cho máy đếm Geiger–Müller cũng khá rắc rối; đó cũng là lý do máy có tên kép. Người ta cần một chất khí dập tắt tia lửa điện để máy đếm sẵn sàng đếm hạt kế tiếp. Müller là phụ tá của Geiger; ông đã cải tiến máy đếm bằng cách thêm vào buồng một tỷ lệ rượu thích hợp. Người ta thường truyền miệng một chuyện châm biếm là điều này đã được khám phá khi các cộng sự khác đã nỗ lực nhưng không thành công lúc Müller đi vắng. Khi Müller, đã ngà ngà, trở lại thì mọi việc đâu vào đó. Tuy vậy, đây là một câu chuyện nhảm nhí. Ngày nay, máy đếm Geiger–Müller



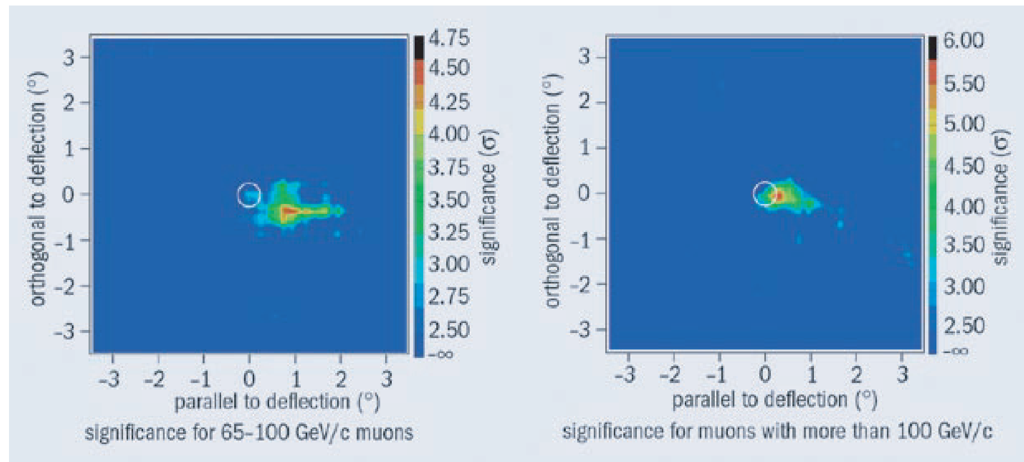
HÌNH 103 Một máy đếm Geiger–Müller có ống dò có thể tháo rời, dây nối với máy đếm điện tử và riêng với mẫu này, có thêm máy chơi nhạc (© Joseph Reinhardt).



HÌNH 104 Một buồng tia lửa điện hiện đại cho thấy các tia vũ trụ đều đặn bay tới Trái đất (QuickTime film © Wolfgang Rueckner).

được sử dụng khắp thế giới để phát hiện các tia phóng xạ; mẫu máy nhỏ nhất đặt vừa trong mobile phone và đồng hồ đeo tay. Một thí dụ được trình bày trong Hình 103.

Nếu bạn có dịp quan sát buồng tia lửa điện hoạt động hãy tận dụng nó. Có một máy



HÌNH 105 Bóng trăng do tia vũ trụ tạo thành, khi ta quan sát bằng máy L3 đặt ở CERN. Bóng bị dịch chuyển so với vị trí của Mặt trăng, đánh dấu bằng vòng tròn trắng, vì từ trường của Trái đất làm lệch các hạt mang điện của tia vũ trụ (© CERN Courier).

đặt trong tiền sảnh của CERN kích thước khoảng $0.5\,m^3$. Mỗi phút vài lần, bạn có thể thấy các tia lửa hồng hiển thị các vết của tia vũ trụ. Các tia này xuất hiện thành từng nhóm, được gọi là *mưa rào*. Chúng liên tục chạm vào người của chúng ta.

Các máy phát hiện hạt khác cũng cho phép ta đo được năng lượng của hạt. Năng lượng của các hạt trong tia vũ trụ trải rộng từ 10^3 eV tới 10^{20} eV; con số sau là năng lượng của một banh tennis sau khi được giao nhưng lại là của một ion đơn lẻ. Đây là một dải năng lượng khổng lồ. Việc tìm hiểu nguồn gốc của tia vũ trụ là một lĩnh vực riêng. Nhiều tia có nguồn gốc thiên hà, một số ở ngoài thiên hà. Các nguồn có năng lượng mạnh nhất có thể là tàn dư của siêu tân tinh – pulsar và các sao tương tự. Tuy vậy, người ta vẫn chưa biết rõ nguồn hạt có năng lượng lớn nhất; có thể đó là hố đen trong khi hình thành.

Có lẽ tia vũ trụ là loại bức xạ duy nhất mà khi khám phá không cần đến cái bóng. Nhưng người ta lại tìm thấy bóng. Trong một thí nghiệm được thực hiện năm 1994, người ta đã quan sát được bóng của Mặt trăng trên các tia vũ trụ năng lượng cao (khoảng 10 TeV) như trong Hình 105. Khi so vị trí của bóng với vị trí thực của Mặt trăng người ta đã tìm thấy một độ dịch chuyển. Thật vậy, do từ trường của Trái đất, bóng của Mặt trăng do tia vũ trụ tạo nên lệch về phía Tây trong trường hợp proton và lệch về phía Đông trong trường hợp antiproton. Dữ liệu nhất quán với tỷ lệ antiproton trong tia vũ Xem 158 trụ trong khoảng 0 % và 30 %. Bằng cách nghiên cứu vị trí của bóng, thí nghiệm chứng tỏ rằng tia vũ trụ năng lượng cao chủ yếu là hạt mang điện dương, là vật chất, chỉ có một phần nhỏ, nếu có, là phản vật chất.

Quan sát kỹ lưỡng người ta thấy rằng các tia vũ trụ đến mặt đất là một hỗn hợp nhiều Trang 175 loại hạt, như trong Bảng 13. Chúng từ bên ngoài khí quyển đi vào, phần lớn là proton, rồi hạt α, hạt nhân sắt và hạt nhân khác. Và như đã đề cập ở trên, phần lớn các tia không đến từ Mặt trời. Nói cách khác, hạt nhân đã thiên lý độc hành. Đúng ra sự phân bố về hướng của các tia vũ trụ chứng tỏ rằng nhiều tia phải có nguồn gốc ngoài thiên hà. Thật vậy, các hạt nhân điển hình của tia vũ trụ được bắn ra từ các ngôi sao và được gia tốc do



HÌNH 106 Bắc cực quang trong bầu trời đêm do các hạt tích điện tạo ra (© Jan Curtis).

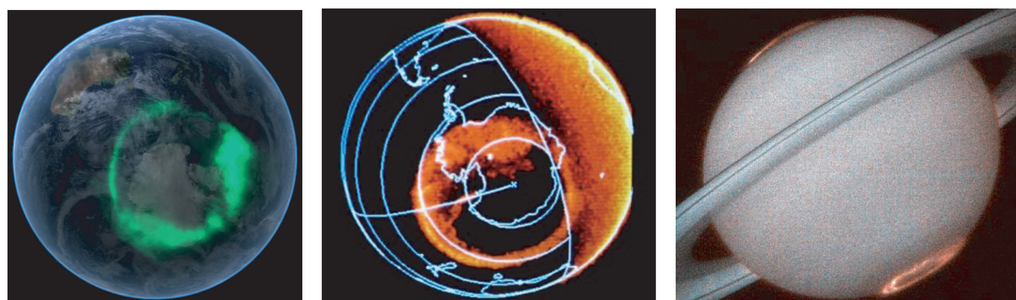
các vụ nổ của siêu tân tinh. Khi đến Trái đất, chúng tương tác với khí quyển trước khi đến mặt đất. Cơ chế gia tốc của tia vũ trụ ngay tại nguồn vẫn còn là đề tài nghiên cứu.

Thông lượng tia vũ trụ *có mang điện* đến mặt đất phụ thuộc năng lượng của chúng. Ở mức năng lượng thấp nhất, các tia vũ trụ có mang điện chạm vào cơ thể người nhiều lần trong 1 s. Thí nghiệm cũng chứng tỏ rằng các tia này đến thành từng nhóm không đều, như *các đám mưa rào*. Đúng ra thông lượng *neutrino* có bậc của độ lớn cao hơn thông lượng của các tia mang điện, nhưng không ảnh hưởng nhiều đến cơ thể chúng ta. Trang 256

Các tia vũ trụ có nhiều tác dụng trong đời sống hằng ngày. Thông quacác điện tích mà chúng tạo ra trong khí quyển, có lẽ chúng chịu trách nhiệm cho việc khơi mào và gây ra các đường ngoằn ngoèo răng cưa của các tia sét. (Sét đánh thành từng xung, xen kẽ giữa hai giai đoạn truyền nhanh khoảng 30 m với truyền chậm, cho đến khi chúng kết nối với nhau. Hướng của chúng tại các điểm truyền chậm phụ thuộc gió và sự phân bố điện tích trong khí quyển.) Các tia vũ trụ có vai trò quan trọng trong việc tạo ra các giọt mưa, các hạt băng trong mây và vai trò gián tiếp trong việc tích điện của các đám mây. Tia vũ trụ cùng với các tia phóng xạ của môi trường cũng khởi động cho máy phát điện Kelvin. Quyển III, trang 217

Nếu không có từ trường của Trái đất, ta có thể bị bệnh do các tia vũ trụ gây ra. Từ trường làm các tia lệch về phía các cực từ. Thượng và hạ tầng khí quyển cũng giúp cho động vật sinh tồn bằng cách che chắn các tia vũ trụ tai hại. Thật vậy, phi công và nhân viên hàng không có thời gian phơi bức xạ nhiều, không có lợi cho sức khoẻ. Tia vũ trụ cũng là một trong nhiều nguyên do khiến cho các cuộc du hành vũ trụ dài, như khi đi đến Hoả tinh, không phải dành cho con người. Khi phi hành gia phơi dưới bức xạ quá lâu, cơ thể sẽ trở nên yếu ớt dễ gây ra cái chết. Các người hùng không gian, kể cả trong truyện khoa học giả tưởng, sẽ không 'thọ' quá 2 hay 3 năm. Quyển III, trang 19

Tia vũ trụ cũng tạo ra các chớp sáng màu tuyệt đẹp trong mắt phi hành gia ; họ thường xuyên thưởng ngoạn sự kiện này trong các cuộc hành trình của họ. (Và hậu quả là họ thường bị đục thuỷ tinh thể.) Nhưng tia vũ trụ không phải chỉ gây ra nguy hiểm hay



HÌNH 107 Hai nam cực quang trên Trái đất nhìn từ không gian (một hình tổng hợp bằng cách chồng chập cường độ của tia tử ngoại và tia X) và cực quang kép trên Thổ tinh (NASA).

sinh ra cái đẹp. Chúng còn hữu ích nữa. Nếu không có các tia vũ trụ chúng ta sẽ không có mặt trên đời này. Tia vũ trụ gây ra sự đột biến và do đó nó là nguyên nhân sinh ra sự tiến hoá sinh học. Ngày nay, hiệu ứng này được sử dụng một cách nhân tạo; bằng cách đặt các tế bào vào môi trường phóng xạ ta sẽ tạo được các dòng mới. Các nhà chăn nuôi thường tạo ra các thể đột biến mới bằng cách này.

Ta không thể nhìn thấy trực tiếp tia vũ trụ, nhưng người anh em của chúng là các tia 'mặt trời' thì có thể thấy được. Đây là quang cảnh ngoạn mục nhất khi chúng ồ ạt kéo đến. Trong trường hợp đó, các hạt này bị từ trường của Trái đất đẩy lệch về phía hai cực tạo thành *Bắc cực quang* (ở Bắc cực) hay *Nam cực quang* (ở Nam cực). Các tấm màn ánh sáng nhiều màu sắc và chuyển động chậm chạp này là hiện tượng đẹp mắt nhất trên bầu trời đêm. (Xem Hình 106 hay www.nasa.gov/mov/105423main_FUV_2005-01_v01.mov.) Ánh sáng khả kiến và Tia X được phát ra ở độ cao từ 60 đến 1000 km. Nhìn từ không gian, màn cực quang tạo thành hình tròn đường kính vài ngàn km quanh các từ cực. Cực quang cũng có trong các hành tinh khác thuộc Thái dương hệ. Cực quang bắt nguồn từ lõi từ trường mà ta đã quan sát được trên Mộc tinh, Thổ tinh, Thiên vương tinh, Hải vương tinh, Trái đất, Io và Ganymede. Để tham khảo có thể xem Hình 107. Cực quang bắt nguồn từ các cơ chế khác đã được tìm thấy trên Kim tinh và Hoả tinh.

Tia vũ trụ chủ yếu là các hạt nhân tự do. Dần dần các nhà nghiên cứu cũng thấy rằng trong nhiều trường hợp khác cũng có hạt nhân không có đám mây electron xuất hiện. Đúng ra đa số các hạt nhân trong vũ trụ không có chút mây electron nào: bên trong các ngôi sao, không có hạt nhân nào được các electron liên kết bao quanh; tương tự, phần lớn vật chất liên thiên hà chỉ có proton. Ngày nay người ta đã biết rằng phần lớn vật chất trong vũ trụ là proton hay hạt α nằm trong các ngôi sao và trong vùng khí loãng giữa các thiên hà. Nói cách khác, tương phản với những điều mà người Hy Lạp đã nói, vật chất thường không được tạo thành từ các nguyên tử mà phần lớn là từ các hạt nhân trần trụi. Môi trường hằng ngày của chúng ta là một ngoại lệ khi nhìn ở quy mô vũ trụ. Trong thiên nhiên, nguyên tử khá hiếm còn hạt nhân trần trụi thì phổ biến hơn.

Tình cờ là hạt nhân không bắt buộc phải di chuyển; nó có thể được lưu trữ trong tình trạng gần như không chuyển động. Có nhiều phương pháp – thường được sử dụng trong các nhóm nghiên cứu – để chồng chập điện trường và từ trường, sao cho một hạt nhân riêng lẻ có thể được giữ lơ lửng trong không khí; ta đã bàn đến khả năng này trong phần bay lơ lửng trước kia.

Quyển III, trang 225

Phân rã hạt nhân – nói thêm về phóng xạ

Không phải tất cả các hạt nhân đều bền. Thông tin đầu tiên về điều này là sự suy giảm độ phóng xạ theo thời gian. Người ta đã thấy rằng số tia phát xạ N *giảm đi*. Nói chính xác hơn, độ phóng xạ giảm đi tuân theo quy luật hàm số mũ đối với thời gian t:

$$N(t) = N(0)\,e^{-t/\tau} \,. \qquad (54)$$

Tham số τ, được gọi là *thời gian sống* hay *thời gian phân rã*, phụ thuộc loại hạt nhân phóng xạ. Thời gian sống có thể thay đổi từ ít hơn 1 microsecond tới hàng triệu triệu năm. Biểu thức này đã được kiểm tra trong thời gian 34 lần τ; thí nghiệm đã cho thấy là nó đúng và chính xác. Điều hiển nhiên là công thức (54) gần đúng đối với một số lớn nguyên tử, vì người ta giả sử $N(t)$ là một biến liên tục. Dù gần đúng nhưng chứng minh công thức này từ Thuyết lượng tử không phải là chuyện đơn giản, như ta đã thấy ở trên.
Trang 48
Mặc dù về nguyên tắc, hiệu ứng Zeno lượng tử có thể xuất hiện trong thời gian t nhỏ, nhưng trong trường hợp phóng xạ thì người ta chưa thấy.

Thay vì thời gian sống, người ta thường sử dụng chu kỳ bán rã. *Chu kỳ bán rã* là thời gian để độ phóng xạ giảm đi *phân nửa*. Bạn có thể tìm ra mối liên hệ giữa hai loại thời gian không?
Câu đố 118 s

Hiện tượng phóng xạ là sự phân rã của các hạt nhân không bền. Trước tiên, sự phóng xạ cho phép ta đếm số nguyên tử trong lượng vật chất đã cho. Hãy tưởng tượng ta đã đo khối lượng chất phóng xạ lúc đầu thí nghiệm; bạn đã chọn một nguyên tố có thời gian sống là một ngày. Bạn sẽ đặt chất này vào trong một hộp nhấp nháy. Sau vài tuần số chớp sáng ít đến nỗi bạn có thể đếm được chúng; sử dụng biểu thức (54) bạn có thể xác định số nguyên tử lúc ban đầu. Độ phóng xạ cho phép ta xác định số nguyên tử và kích thước của chúng, cộng thêm kích thước của hạt nhân.

Định luật phân rã theo hàm mũ (54) và sự giải phóng năng lượng là tính chất điển hình của các hệ *nửa bền*. Vào năm 1903, Rutherford và Soddy đã khám phá ra trạng thái năng lượng thấp nhất của các nguồn phóng xạ α và β. Trong trường hợp này, sự phóng xạ làm thay đổi nguyên tử phát xạ; đó là sự biến nguyên tố tự phát. Một nguyên tử phát ra tia α hay tia β sẽ thay đổi bản chất hoá học của nó. Hiện tượng phóng xạ, trong trường
Quyển I, trang 405
hợp hạt nhân, sẽ dẫn tới cùng một kết quả mà Cơ học thống kê của chất khí đã suy ra trong trường hợp nguyên tử: chúng là các hạt lượng tử có cấu trúc thay đổi theo thời gian.

— Trong trường hợp phân rã *α*, hạt nhân phóng xạ phát ra một nhân helium có (điện tích kép) – còn được gọi là *hạt α*. Động năng thường là nhiều MeV. Sau khi phát xạ, trong bảng phân loại tuần hoàn, hạt nhân đã chuyển ra trước 2 vị trí. Phân rã α chủ yếu xảy ra cho các hạt nhân nhiều proton. Một thí dụ về phân rã α là sự phân rã của đồng vị của uranium ^{238}U.
— Trong trường hợp phân rã *β* – một neutron biến đổi thành một proton đồng thời phát ra một electron – còn được gọi là hạt *β* – và một antineutrino. Phân rã β cũng làm thay đổi bản chất hoá học của nguyên tử và chuyển nó sang vị trí của nguyên tố phía sau trong bảng phân loại tuần hoàn. Thí dụ về nguồn phóng xạ β là carbon phóng xạ
Trang 240
^{14}C, ^{38}Cl và ^{137}Cs, đồng vị được thải ra từ các lò phản ứng bị hỏng. Một dạng phóng xạ khác là phân rã β^+, trong đó một proton biến đổi thành một neutron đồng thời

phát ra một neutrino và một positron. Phản ứng xảy ra trong các hạt nhân nhiều proton, thí dụ như ^{22}Na. Một biến thể nữa là sự bắt electron; có đôi khi hạt nhân bắt lấy một electron trên vân đạo, một proton biến đổi thành một neutron đồng thời phát ra một neutrino. Điều này xảy ra trong ^{7}Be. Cũng có phân rã β liên kết, như ta gặp trong ^{187}Re, là một biến thể của phân rã β.
— Trong trường hợp phân rã γ – hạt nhân biến đổi trạng thái kích thích sang trạng thái có năng lượng thấp hơn bằng cách phát ra một photon có năng lượng cao, hay hạt γ. Trong trường hợp này, bản chất hoá học của nguyên tử không bị thay đổi. Năng lượng nằm trong khoảng MeV. Do có năng lượng lớn, tia γ ion hoá vật chất mà chúng gặp; vì chúng không mang điện nên không bị vật chất hấp thu và có tính đâm xuyên cao. Bức xạ γ là loại phóng xạ (môi trường) nguy hiểm nhất. Một thí dụ của phân rã γ là ^{99m}Tc. Một biến thể của phân rã γ là *sự chuyển dịch đồng phân*. Một biến thể khác là *sự biến hoán trong*, mà người ta đã quan sát được trong ^{137m}Ba.
— Trong trường hợp *phát xạ neutron* hạt nhân phát ra một neutron. Sự phân rã này hiếm thấy trên Trái đất nhưng thường xảy ra trong các vụ nổ của ngôi sao. Nhiều nguồn phát xạ neutron có chu kỳ bán rã chỉ vài giây. Một thí dụ là ^{5}He và ^{17}N.
— Quá trình *phân hạch tự phát* được khám phá vào năm 1940. Sản phẩm phân rã có thay đổi ngay cả trong trường hợp hạt nhân ban đầu giống nhau. ^{239}Pu ^{235}U có thể phân rã tự phát mặc dù xác suất nhỏ.
— Trong trường hợp *phát xạ proton* hạt nhân phát ra một proton. Sự phân rã này tương đối hiếm và chỉ xảy ra trong khoảng 100 nuclide thí dụ như đối với ^{53m}Co và ^{4}Li. Trường hợp đầu tiên chỉ được khám phá vào năm 1970. Vào khoảng năm 2000, sự phát xạ đồng thời 2 proton được quan sát thấy lần đầu tiên.
— Năm 1984, người ta khám phá ra *sự phát xạ đám* hay *phát xạ ion nặng*. Một phần nhỏ hạt nhân ^{223}Ra phân rã nhờ phát xạ hạt nhân ^{14}C. Sự phân rã này xảy ra cho nửa tá nuclide. Người ta cũng đã quan sát được sự phát xạ ^{18}O.

Xem 159 Cũng có nhiều phân rã kết hợp và hoà trộn với nhau. Các vật lý gia hạt nhân đã nghiên cứu các phân rã này. Phóng xạ là một quá trình phổ biến. Thí dụ như trong cơ thể người có khoảng 9000 phân rã phóng xạ xảy ra trong 1s, 4.5 kBq (0.2 mSv/a) từ ^{40}K và 4 kBq từ ^{14}C (0.01 mSv/a). Tại sao điều này không nguy hiểm? Câu đố 119 s

Mọi hiện tượng phóng xạ đều kèm theo sự toả ra năng lượng. Năng lượng toả ra từ một nguyên tử qua hiện tượng hay phản ứng phân rã thường lớn hơn năng lượng trong phản ứng hoá học hàng triệu lần. Như vậy một quá trình phóng xạ là một vụ nổ vi mô. Chất phóng xạ mạnh sẽ toả ra nhiều năng lượng. Đó là nguyên do của sự nguy hiểm của vũ khí hạt nhân.

Điều gì phân biệt các nguyên tử phân rã với nguyên tử không phân rã? Định luật phân rã theo hàm mũ hàm ý rằng xác suất phân rã độc lập với tuổi của nguyên tử. Tuổi không có vai trò gì cả. Ta cũng đã biết từ Nhiệt động lực học là mọi nguyên tử đều có tính chất như nhau. Như vậy làm sao tách ra một nguyên tử đang phân rã? Phải mất khoảng 30 năm để người ta khám phá ra rằng phân rã phóng xạ cũng giống như các phân rã khác, là các hiệu ứng lượng tử. Mọi phân rã đều do các thăng giáng thống kê của chân không, hay nói chính xác hơn, do các thăng giáng lượng tử của chân không kích khởi. Thật vậy, phóng xạ là một trong những thí nghiệm rõ ràng nhất chứng tỏ Vật lý cổ điển không đủ để mô tả thiên nhiên. Câu đố 120 e Quyển IV, trang 114

Hiện tượng phóng xạ là một hiệu ứng lượng tử thuần tuý. Chỉ có một lượng tử tác



HÌNH 108 Một khối phổ kế hiện đại dùng để xác định niên đại bằng carbon phóng xạ tại Viện hàn lâm khoa học Hungary (© HAS).

dụng hữu hạn mới có thể làm cho hệ vẫn không đổi cho tới khi nó phân rã một cách đột ngột. Thật vậy, năm 1928 George Gamow đã giải thích phân rã α bằng hiệu ứng xuyên hầm. Ông nhận thấy rằng hiệu ứng xuyên hầm giải thích được mối liên hệ giữa thời gian sống và phạm vi của các tia, cũng như các thay đổi có thể đo được của thời gian sống – trong khoảng 10 ns và 10^{17} năm – là hệ quả của việc vượt qua các rào thế thay đổi trong các hạt nhân khác nhau.

Xác định niên đại bằng phép đo phóng xạ

Dựa vào các tác dụng hoá học của hiện tượng phóng xạ, tỷ lệ của các nguyên tố trong khoáng chất sẽ giúp ta xác định *tuổi* của khoáng chất đó. Việc sử dụng hiện tượng phân rã phóng xạ để suy ra niên đại của một mẫu vật được gọi là *Sự xác định niên đại bằng phép đo phóng xạ*. Bằng kỹ thuật này, các nhà địa chất xác định tuổi của núi, trầm tích và các lục địa. Họ xác định lúc mà các lục địa tách rời nhau, lúc núi non hình thành khi các lục địa đụng nhau và lúc các đá hoá sinh được tạo ra. Có bất ngờ ở điểm nào không? Không. Thời điểm được tìm thấy nhờ phép đo phóng xạ nhất quán với thang thời gian tương đối mà các nhà địa chất đã xác định một cách độc lập trong nhiều thế kỷ trước khi kỹ thuật này ra đời. Sự xác định niên đại bằng phép đo phóng xạ khẳng định những gì đã biết trước đó.

Xem 161 Xác định niên đại bằng phép đo phóng xạ là một khoa học. Một tổng quan về các

BẢNG 14 Các đồng vị thiên nhiên chính được sử dụng trong việc xác định niên đại bằng phép đo phóng xạ.

Đồng vị	Sản phẩm phân rã	Chu kỳ bán rã	Phương pháp sử dụng	Thí dụ
^{147}Sm	^{143}Nd	106 Ga	phương pháp samarium–neodymium	đá, đất Mặt trăng, thiên thạch
^{87}Rb	^{87}Sr	48.8 Ga	phương pháp rubidium–strontium	đá, đất Mặt trăng, thiên thạch
^{187}Re	^{187}Os	42 Ga	phương pháp rhenium–osmium	đá, đất Mặt trăng, thiên thạch
^{176}Lu	^{176}Hf	37 Ga	phương pháp lutetium–hafnium	đá, đất Mặt trăng, thiên thạch
^{40}K	^{40}Ar	1.25 Ga	phương pháp potassium–argon & argon–argon	đá, đất Mặt trăng, thiên thạch
^{40}K	^{40}Ca	1.25 Ga	phương pháp potassium–calcium	xác định niên đại cho granite, không chính xác
^{232}Th	^{208}Pb	14 Ga	phương pháp thorium–chì, phương pháp chì–chì	đá, đất Mặt trăng, thiên thạch
^{238}U	^{206}Pb	4.5 Ga	phương pháp uranium–chì, phương pháp chì–chì	đá, đất Mặt trăng, thiên thạch
^{235}U	^{207}Pb	0.7 Ga	phương pháp uranium–chì, phương pháp chì–chì	đá, đất Mặt trăng, thiên thạch
^{234}U	^{230}Th	248 ka	phương pháp uranium–thorium	san hô, stalagmites, xương, răng
^{230}Th	^{226}Ra	75.4 ka	phương pháp thorium-radon	thực vật
^{26}Al	^{26}Mg	0.72 Ma	xác định niên đại các sản vật của siêu tân tinh, do các tia vũ trụ tạo ra	kiểm tra sự tổng hợp hạt nhân vẫn xảy ra trong thiên hà
^{10}Be	^{10}B	1.52 Ma	xác định niên đại bằng phép đo phóng xạ do các tia vũ trụ tạo ra	lõi băng
^{60}Fe	^{60}Ni	2.6 Ma (không phải 1.5 Ma)	xác định niên đại các sản vật của siêu tân tinh	vỏ trái đất dưới đáy biển sâu
^{36}Cl	^{36}Ar	0.3 Ma	xác định niên đại bằng phép đo phóng xạ do các tia vũ trụ tạo ra	lõi băng
^{53}Mn	^{53}Cr	3.7 Ma	xác định niên đại bằng phép đo phóng xạ do các tia vũ trụ tạo ra	thiên thạch, biến cố tuyệt chủng K-T
^{182}Hf	^{182}W	9 Ma	xác định niên đại bằng phép đo phóng xạ do các tia vũ trụ tạo ra	thiên thạch, trầm tích
^{14}C	^{14}N	5730 a	phương pháp đo carbon phóng xạ do các tia vũ trụ tạo ra	gỗ, y phục, xương, chất hữu cơ, rượu
^{137}Cs	^{137}Ba	30 a	đếm tia γ	thực phẩm và rượu sau tai hoạ hạt nhân
^{210}Pb		22 a	đếm tia γ	định tuổi rượu
^{3}H	^{3}He	12.3 a	đếm tia γ	định tuổi rượu

đồng vị được sử dụng cùng với các ứng dụng đặc biệt trong việc xác định niên đại các
Trang 183 mẫu vật được liệt kê trong Bảng 14. Bảng này cho ta thấy mức độ mà kỹ thuật xác định niên đại bằng phép đo phóng xạ đã can thiệp vào Thiên văn học, Địa chất học, Sinh học
Xem 160 tiến hoá, Khảo cổ học và Lịch sử (làm giảm số người cuồng tín). Thời gian sống của chất phóng xạ thường được đo với độ chính xác từ 1/100 tới 2/100 và trong thực nghiệm cũng như trên lý thuyết chúng không làm thay đổi thang thời gian địa chất. Kết quả là phương pháp này có độ chính xác đến khó tin. Bạn có thể hình dung ra cách đo chu kỳ bán rã
Câu đố 121 s hàng tỷ năm với độ chính xác cao không?

Phương pháp này cũng rất thành công trong lĩnh vực Lịch sử cổ đại. Với *phương pháp dùng carbon phóng xạ*, các sử gia xác định được niên đại của các nền văn minh và tuổi của các nghệ phẩm của loài người.* Nhiều nguy tín đã bị xoá bỏ. Trong một số cộng
Xem 160 đồng tín ngưỡng sự choáng váng vẫn chưa lắng xuống mặc dù đã nhiều năm trôi qua.

Sự xác định niên đại bằng carbon phóng xạ sử dụng phân rã β của đồng vị phóng xạ carbon ^{14}C, có thời gian phân rã là 5730 a. Đồng vị này được tạo ra liên tục trong khí quyển do ảnh hưởng của tia vũ trụ thông qua phản ứng $^{14}\mathrm{N} + \mathrm{n} \rightarrow \mathrm{p} + {}^{14}\mathrm{C}$. Kết quả là nồng độ carbon phóng xạ trong khí quyển gần như không đổi theo thời gian. Bên trong cây còn sống, sự biến dưỡng (vô tình) giữ nguyên nồng độ. Khi cây chết, sự phân rã có tác dụng. Thời gian sống vài ngàn năm đặc biệt hữu ích cho việc định tuổi các vật liệu lịch sử. Do đó, phương pháp carbon phóng xạ đã được sử dụng để xác định tuổi của xác ướp, các dụng cụ thời tiền sử và các thánh tích tôn giáo. Phiên bản ban đầu của phương pháp này là đo lượng chất carbon phóng xạ khi xảy ra phân rã và các nhấp nháy do nó tạo ra. Một bước cải tiến đã được tạo ra khi khối phổ kế trở nên thông dụng. Người ta không cần chờ phân rã: ta có thể xác định trực tiếp lượng ^{14}C. Kết quả là chỉ cần có một lượng nhỏ carbon, cỡ 0.2 mg, để có phép đo chính xác. Một lượng nhỏ như vậy có thể tách ra từ mẫu vật mà không làm cho nó tổn hại nhiều. Khối phổ kế cho ta thấy rằng nhiều thánh tích tôn giáo là đồ giả, như tấm vải ở Turin, ngoài ra, những người giữ chúng là những kẻ lừa đảo.

Các nhà nghiên cứu đã phát triển thêm một phương pháp để định tuổi đá bằng độ phóng xạ. Khi một tia α phát ra, nguyên tử phát xạ sẽ giật lùi. Nếu nguyên tử là một phần của tinh thể thì tinh thể sẽ bị hư hại. Trong nhiều chất, sự tổn hại này có thể quan sát được bằng kính hiển vi. Bằng cách đếm các vùng bị hư hại người ta có thể xác định thời điểm đá đã kết tinh. Theo cách này người ta có thể xác định lúc chất lỏng từ núi lửa phun ra trở thành đá.

Nhờ phương pháp này lần đầu tiên người ta đã có thể xác định tuổi của đá một cách chính xác, so sánh nó với tuổi của thiên thạch và khi du hành không gian trở nên thịnh hành, so sánh với tuổi của Mặt trăng. Kết quả này vượt ngoài sự ước tính và mong đợi: đá và thiên thạch cổ xưa nhất, được nghiên cứu một cách độc lập bằng cách sử dụng các
Xem 162 phương pháp xác định niên đại khác nhau, có tuổi khoảng 4570(10) triệu năm. Từ con số này, tuổi của Trái đất được ước tính là 4540(50) triệu năm. Trái đất *già* thực sự.

Nhưng nếu Trái đất già như vậy thì tại sao trong thời gian đó lõi của nó lại không lạnh đi?



HÌNH 109 Biển dung nham trong núi lửa Erta Ale ở Ethiopia (© Marco Fulle).

Tại sao địa ngục lại nóng?

Biển dung nham và các dòng dung nham tìm thấy trong và quanh núi lửa là nguồn gốc của các hình ảnh mà nhiều nền văn hoá đã gán cho địa ngục: lửa và sự đau khổ. Vì dung nham có nhiệt độ cao, địa ngục không tránh được việc bị xem như là một nơi nóng rực nằm ở tâm Trái đất. Một thí dụ nổi bật là núi lửa Erta Ale, trong Hình 109. Nhưng tại sao dung nham lại nóng sau khi đã trải qua hàng triệu năm?

Tính toán trực tiếp sẽ cho ta thấy rằng nếu Trái đất đã là một quả cầu nóng lúc ban đầu thì nó sẽ phải nguội đi và hoá rắn cách nay rất lâu. Trái đất sẽ là một vật rắn giống như Mặt trăng: không có magma và cũng không phun ra tí dung nham nào; địa ngục sẽ không nóng. Câu đố 122 ny

Hiện tượng phóng xạ sẽ là lời giải cho câu đố này: tâm Trái đất là một cái lò được cung cấp năng lượng ước chừng từ 8 tới 10 TW từ uranium ^{235}U và ^{238}U phóng xạ, từ 8 tới 10 TW từ thorium ^{232}Th phóng xạ và khoảng 4 TW từ potassium ^{40}K phóng xạ. Sự phóng xạ của các nguyên tố này, và một số nguyên tố khác thì tối thiểu cũng làm cho tâm Trái đất sáng rực. Khi nghiên cứu kỹ hơn và có tính đến thời gian phân rã và nồng độ vật chất đo được người ta thấy rằng cơ chế này giải thích được nội nhiệt của Trái đất. (Thêm nữa, sự phân rã của potassium phóng xạ là nguồn gốc của 1 % argon tìm thấy trong khí quyển của Trái đất.) Xem 163 Trang 183

Tóm lại, sự phóng xạ giữ cho dung nham nóng. Phóng xạ là nguyên do làm cho ta nghĩ là địa ngục phải nóng. Điều này dẫn tới một câu đố: tại sao sự phóng xạ của dung nham và Trái đất không gây nguy hiểm cho chúng ta? Câu đố 123 s

* Năm 1960, nhà phát triển kỹ thuật carbon phóng xạ, Willard Libby, nhận được giải Nobel hoá học.

Hạt nhân có thể tạo thành các chất phức hợp

Hạt nhân sẽ không bền khi chúng chứa trên 280 nucleon. Hạt nhân có nhiều nucleon sẽ không tránh khỏi việc phân rã thành các phần nhỏ hơn. Tóm lại, hạt nhân nặng không bền. Nhưng khi khối lượng lớn hơn 10^{57} nucleon, chúng lại bền: các hệ như vậy được gọi là *sao neutron*. Đây là một thí dụ cực hạn của vật chất thuần hạt nhân tìm thấy trong thiên nhiên. Sao neutron là phần còn lại của các vụ nổ siêu tân tinh (loại II). Chúng không còn chứa các phản ứng dung hợp hạt nhân như các ngôi sao khác; một cách gần đúng ta có thể xem sao neutron như một hạt nhân lớn.

Sao neutron được tạo thành từ vật chất suy biến. Mật độ 10^{18} kg/m^3 chỉ bằng vài lần mật độ của một hạt nhân, do lực hấp dẫn đã nén ngôi sao lại. Mật độ này có nghĩa là một muỗng chất sao đó có khối lượng hàng trăm triệu tấn. Sao neutron có đường kính khoảng 10 km. Chúng không thể nhỏ hơn vì như vậy sẽ không bền. Chúng cũng không lớn hơn vì như vậy sao neutron sẽ biến thành hố đen.

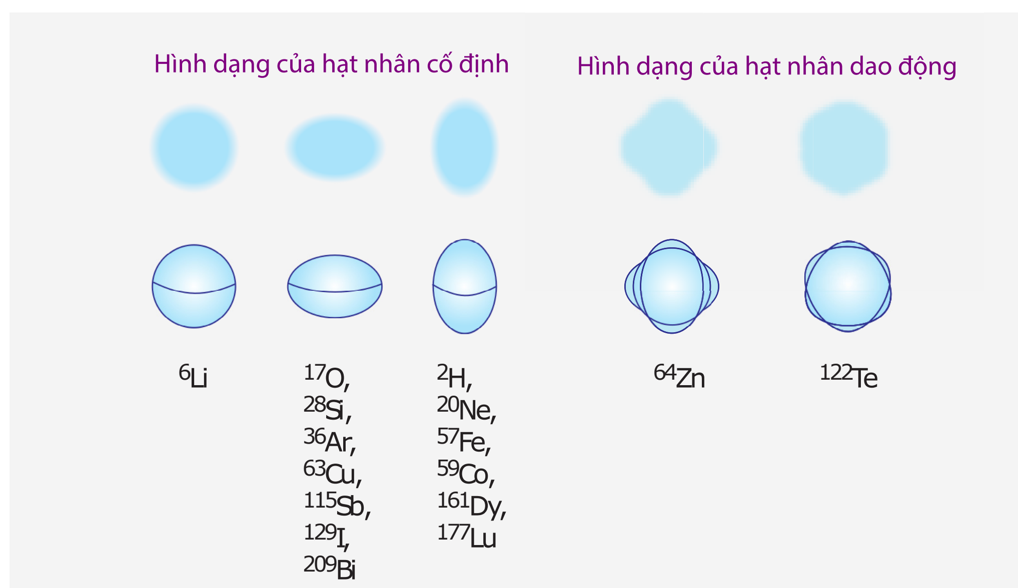
Hạt nhân có màu sắc và hình dạng

Trong đời sống hằng ngày, màu sắc của vật được xác định bằng bước sóng của ánh sáng mà vật hấp thu ít nhất, hay nếu nó phát sáng, thì đó là bước sóng của ánh sáng do nó phát ra. Hạt nhân cũng có thể hấp thu photon có năng lượng thích hợp và chuyển sang trạng thái kích thích. Trong trường hợp này, năng lượng của photon được biến đổi thành năng lượng của một hay nhiều nucleon bên trong hạt nhân. Nhiều hạt nhân phóng xạ cũng phát ra các photon năng lượng cao, được gọi là tia γ, trong phạm vi 1 keV (hay 0.2 fJ) tới hơn 20 MeV (hay 3.3 pJ). Sự phát xạ tia γ của hạt nhân tương tự như sự phát xạ ánh sáng của các electron trong nguyên tử. Từ năng lượng, số lượng và thời gian sống của các trạng thái kích thích – trong phạm vi từ 1 ps tới 300 ngày – các nhà nghiên cứu có thể tìm ra cách chuyển động của các nucleon trong hạt nhân.

Tóm lại, năng lượng photon của các tia γ được phát xạ hay hấp thu xác định 'màu sắc' của hạt nhân. Quang phổ của tia γ có thể được sử dụng giống như màu sắc để phân biệt các loại hạt nhân và để nghiên cứu chuyển động của chúng. Đặc biệt, quang phổ phát xạ của tia γ có thể được sử dụng để xác định thành phần hoá học của một mẩu vật chất. Một số vạch chuyển dời hẹp đến nỗi người ta có thể sử dụng chúng để nghiên cứu sự thay đổi bắt nguồn từ môi trường hoá học của hạt nhân, xác định chuyển động của hạt nhân trong chất rắn hay phát hiện hiệu ứng Doppler do lực hấp dẫn.

Việc nghiên cứu tia γ cũng cho phép ta xác định *hình dạng* của hạt nhân. Nhiều hạt nhân hình cầu; nhưng nhiều hạt nhân là các ellipsoid dẹt hay thon dài. Ellipsoid là hình dạng thích hợp nếu sự giảm của lực đẩy tĩnh điện trung bình lớn hơn sự gia tăng năng lượng bề mặt. Mọi hạt nhân – trừ hạt nhân nhẹ nhất là helium, lithium và beryllium – có mật độ ở tâm không đổi, vào khoảng 0.17 nucleon mỗi fm^3 và bề dầy của lớp vỏ khoảng 2.4 fm, nơi mật độ của chúng giảm đi. Hạt nhân là các đám mây nhỏ như được minh hoạ trong Hình 110.

Ta đã biết rằng các phân tử có thể có hình dạng cực kỳ phức tạp. Trái lại, đa số hạt nhân có hình cầu, ellipsoid hay hơi khác các hình dạng này. Lý do là trong một phạm vi càng nhỏ, thì sự phân rã trong không gian của các tương tác hạt nhân càng nhanh. Để có được các hình dạng thú vị như trong các phân tử, người ta cần tách khỏi các tương tác gần nhất cũng như các tương tác kế cận các tương tác đó. Để có được điều kiện này thì tương tác mạnh của hạt nhân phải có tầm rất ngắn. Có đúng như vậy không? Có thể



HÌNH 110 Các hình dạng khác nhau của hạt nhân – cố định: hình cầu, hình ellipsoid dẹt, hình ellipsoid thon dài (hình bên trái) và khi dao động (hình bên phải), được thể hiện trong thực tế là các đám mây (hàng trên) và được đơn giản hoá thành các hình hình học đơn giản (hàng dưới).

trong tương lai, người ta sẽ khám phá ra các hạt nhân có hình dạng khác thường như hình kim tự tháp phẳng phiu chẳng hạn. Đã có một số tiên đoán được đưa ra nhưng chưa có thí nghiệm nào được thực hiện. Xem 164

Hình dạng hạt nhân không cố định; nó có thể *dao động*. Người ta đã nghiên cứu chi tiết các dao động như vậy. Hai trường hợp đơn giản nhất, dao động tứ cực và bát cực được biểu diễn trong Hình 110. Ngoài ra, hạt nhân không có hình cầu vẫn có thể quay. Ta đã biết nhiều hạt nhân quay nhanh, với spin lên tới $60\hbar$ hay lớn hơn. Chúng thường chuyển động chậm dần lại, phát ra một photon, đồng thời moment động lượng của nó giảm đi từng bậc một. Gần đây người ta đã khám phá ra hạt nhân cũng có thể có những chỗ phồng quay quanh một lõi cố định hơi giống với thuỷ triều quay quanh Trái đất. Xem 165

Bốn loại chuyển động trong hạt nhân

Hạt nhân nhỏ vì tương tác hạt nhân là tương tác có tầm ngắn. Bắt nguồn từ việc này, tương tác hạt nhân chỉ tham gia vào 4 loại chuyển động:

— *tán xạ*,
— *chuyển động liên kết*,
— *phân rã* và
— tổ hợp của 3 loại trên gọi là *phản ứng hạt nhân*.

Lịch sử vật lý hạt nhân đã chứng tỏ rằng toàn bộ các hiện tượng quan sát được có thể quy về 4 quá trình cơ bản này. Mỗi quá trình là một loại chuyển động. Trong mỗi quá trình, điểm quan trọng là sự so sánh các trạng thái đầu và cuối; các trạng thái trung gian không đáng quan tâm cho lắm. Như vậy tương tác hạt nhân không có các loại chuyển

động phức tạp đặc trưng cho đời sống thông thường. Đó cũng là lý do mà chương này có chiều dài ngắn.

Sự tán xạ xảy ra trong tất cả các thí nghiệm trong máy gia tốc. Những thí nghiệm như vậy đối với hạt nhân chính là sự lặp lại những điều chúng ta làm khi quan sát một vật. Sự quan sát của mắt, hay nhìn một vật, là một thí nghiệm tán xạ, vì sự quan sát chính là sự phát hiện ánh sáng tán xạ. Sự tán xạ của tia X đã được sử dụng để nhìn các nguyên tử trong lần đầu tiên; sự tán xạ của các hạt alpha năng lượng cao được sử dụng để khám phá và nghiên cứu hạt nhân; sau đó sự tán xạ electron có năng lượng lớn hơn được sử dụng để khám phá và nghiên cứu thành phần của proton.

Chuyển động liên kết là chuyển động của proton và neutron trong hạt nhân hay chuyển động của quark trong meson và baryon. Đặc biệt, chuyển động liên kết xác định hình dạng và sự thay đổi hình dạng của các phức hợp: hadron và hạt nhân.

Sự phân rã hiển nhiên là nền tảng của sự phóng xạ. Phân rã hạt nhân có thể bắt nguồn từ tương tác điện từ, tương tác hạt nhân mạnh hay yếu. Sự phân rã cho phép ta nghiên cứu các đại lượng bảo toàn trong tương tác hạt nhân.

Phản ứng hạt nhân là kết hợp của sự tán xạ, sự phân rã và có thể là chuyển động liên kết. Phản ứng hạt nhân đối với hạt nhân cũng giống như sự tiếp xúc của các vật thể trong đời sống hằng ngày. Tiếp xúc với một vật có thể là tách nó ra, bẻ gãy nó, hàn hai vật với nhau, ném vật đi, v.v... Điều tương tự cũng có thể áp dụng cho hạt nhân. Đặc biệt, phản ứng hạt nhân là nguyên nhân Mặt trời và các ngôi sao toả sáng; chúng cũng cho ta biết về cuộc đời của hạt nhân trong cơ thể chúng ta.

Thuyết lượng tử đã chứng tỏ rằng cả 4 loại chuyển động hạt nhân đều có thể mô tả theo một cách. Mỗi loại chuyển động đều bắt nguồn từ *sự trao đổi các hạt ảo*. Thí dụ như sự tán xạ bắt nguồn từ lực đẩy của điện tích tức là sự trao đổi các photon ảo, chuyển động liên kết trong hạt nhân bắt nguồn từ tương tác hạt nhân mạnh tức là sự trao đổi các gluon ảo, phân rã β bắt nguồn từ sự trao đổi các boson W ảo và tương tác neutrino bắt nguồn từ sự trao đổi các boson Z ảo. Phần còn lại của chương này là phần giải thích chi tiết các cơ chế này.

Hạt nhân tương tác

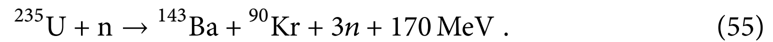
Người được xem là đi tiên phong trong việc tạo ra các nguyên tố siêu Uranium là nhà vật lý thiên tài Enrico Fermi, đã nhận giải Nobel vật lý cho công trình này. Sau đó ít lâu, Otto

Quyển IV, trang 119

Hahn và cộng sự của ông là Lise Meitner và Fritz Strassmann đã chứng tỏ rằng Fermi đã sai và giải thưởng của ông là một sai lầm. Fermi được giữ lại giải thưởng. Uỷ ban trao giải Nobel cũng đã trao giải cho Hahn và Strassmann nhưng lại gây ra một sự bất minh đối với mọi người và đặc biệt với các nữ vật lý gia khi không trao giải cho Lise Meitner. (Mặc dù sau khi bà qua đời, một nguyên tố mới đã được đặt theo tên của bà.)

Khi proton hay neutron được bắn vào hạt nhân, chúng thường gắn vào hạt nhân đó khiến cho nguyên tố này được biến đổi thành một nguyên tố khác nặng hơn. Sau khi đã thí nghiệm trên nhiều nguyên tố, Fermi đã sử dụng uranium; ông nhận thấy rằng khi bắn phá nó bằng neutron, một nguyên tố mới sẽ xuất hiện và kết luận rằng ông đã tạo ra một nguyên tố siêu uranium. Nhưng không may, Hahn và cộng sự đã nhận thấy rằng nguyên tố được tạo ra là một nguyên tố quen thuộc: đó là barium, một hạt nhân có khối lượng nhỏ hơn nửa khối lượng của uranium. Thay vì gắn vào như 91 nguyên tố trước đó, neutron đã *tách đôi* hạt nhân uranium. Tóm lại, Fermi, Hahn, Meitner và Strassmann đã

quan sát được phản ứng:



$$^{235}\mathrm{U} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{143}\mathrm{Ba} + {}^{90}\mathrm{Kr} + 3n + 170\,\mathrm{MeV}\ . \quad (55)$$

Meitner gọi quá trình này là *sự phân hạch*. Năng lượng được giải phóng trong sự phân hạch lớn không ngờ, gấp hàng triệu lần năng lượng tương tác hoá học trong một nguyên tử. Thêm nữa, có nhiều neutron phát ra, tạo nên các quá trình tương tự; sự phân hạch có thể khởi phát một *phản ứng dây chuyền*. Sau đó và (dĩ nhiên) trái với ý muốn của nhóm, khám phá này được ứng dụng để làm ra bom hạt nhân.

Neutron, proton, deuteron hay hạt γ kích khởi các phản ứng hạt nhân. Ngoài việc kích khởi phản ứng phân hạch, neutron còn được sử dụng trong việc biến đổi lithium thành tritium, được sử dụng làm (một loại) nhiên liệu cho lò phản ứng dung hợp; neutron từ tia vũ trụ (thứ cấp) tạo ra carbon phóng xạ từ nitrogen trong khí quyển. Deuteron đập vào tritium tạo ra helium trong lò phản ứng dung hợp hạt nhân. Proton có thể kích khởi sự biến đổi lithium thành beryllium. Photon có thể đẩy hạt alpha hay neutron ra khỏi hạt nhân.

Mọi phản ứng hạt nhân và phân rã là *các phản ứng biến đổi*. Trong mỗi phản ứng này, người Hy Lạp cổ đại đã chỉ cho chúng ta rằng trước tiên là phải tìm kiếm các đại lượng bảo toàn. Ngoài các đại lượng nổi tiếng như năng lượng, động lượng, điện tích và moment động lượng, ta còn có nhiều đại lượng bảo toàn mới. Thuyết trường lượng tử cho rằng hạt và phản hạt (thường được ký hiệu có gạch ngang) phải hành xử theo các phương thức tương hợp. Cả Lý thuyết trường lượng tử lẫn thực nghiệm đều chứng tỏ rằng mọi phản ứng dạng

$$\mathrm{A} + \mathrm{B} \rightarrow \mathrm{C} + \mathrm{D} \quad (56)$$

đều dẫn tới phản ứng

$$\mathrm{A} + \overline{\mathrm{C}} \rightarrow \overline{\mathrm{B}} + \mathrm{D} \quad (57)$$

hay

$$\overline{\mathrm{C}} + \overline{\mathrm{D}} \rightarrow \overline{\mathrm{A}} + \overline{\mathrm{B}} \quad (58)$$

hay, nếu có đủ năng lượng,

$$\mathrm{A} \rightarrow \mathrm{C} + \mathrm{D} + \overline{\mathrm{B}}\ , \quad (59)$$

cũng có thể xảy ra. Như vậy các hạt hành xử giống như các thực thể toán học được bảo toàn.

Thí nghiệm chứng tỏ rằng antineutrino khác với neutrino. Đúng ra mọi phản ứng đều khẳng định *số lepton* được bảo toàn trong thiên nhiên. Số lepton L bằng 0 đối với các nucleon hay quark, bằng 1 đối với electron và neutrino, bằng −1 đối với positron và antineutrino.

Ngoài ra, mọi phản ứng đều bảo toàn *số baryon*. Số baryon B đối với proton và neutron bằng 1 (và 1/3 đối với quark), bằng −1 đối với antiproton và antineutron (và như vậy bằng −1/3 đối với antiquark). Cho đến nay người ta chưa thấy quá trình nào vi phạm sự bảo toàn số baryon. Sự bảo toàn số baryon là một lý do giải thích cho sự nguy hiểm của sự phóng xạ, phản ứng phân hạch và phản ứng dung hợp hạt nhân. Khái niệm số baryon được Ernst Stückelberg (b. 1905 Basel, d. 1984 Geneva), một vật lý gia nổi



HÌNH 111 Sự phá huỷ 4 lò phản ứng hạt nhân ở Fukushima, Nhật Bản, năm 2011, là nơi đã huỷ hoại môi sinh trong phạm vi 30 km xung quanh chúng (courtesy Digital Globe).

tiếng, người khám phá nhiều khái niệm của vật lý hạt, bao gồm giản đồ Feynman trước cả Feynman, đưa ra. Số baryon đã được đổi tên khi Abraham Pais (b. 1918 Amsterdam, d. 2000 Copenhagen) đưa ra các thuật ngữ 'lepton' và 'baryon'.

Bom và lò phản ứng hạt nhân

Sự phân hạch Uranium được kích khởi bằng một neutron, giải phóng năng lượng và sinh ra nhiều neutron khác. Do đó, sự phân hạch uranium có thể kích khởi một *phản ứng dây chuyền* tạo ra một sự bùng nổ hay một phản ứng sinh nhiệt có kiểm soát. Ngày xưa, vào giữa thế kỷ 20, nhiều khoa học gia đã nghiên cứu các quá trình này. Đa số quan tâm đến việc tạo ra vũ khí hay sử dụng năng lượng hạt nhân, mặc dù các hoạt động này gây ra nhiều tác hại cho nền kinh tế, cho sức khoẻ của con người và cho môi trường.

Phần lớn các câu chuyện liên quan đến việc phát triển vũ khí hạt nhân đều cực kỳ ngớ ngẩn. Những vũ khí hạt nhân đầu tiên được các nhà vật lý thông minh nhất thế giới tạo ra trong đệ nhị thế chiến. Mọi điều kiện đều sẵn sàng, bao gồm các mô hình vật lý phức tạp nhất, nhiều nhà máy khổng lồ và một tổ chức tầm cỡ thế giới. Chỉ có một vấn đề nhỏ: không đủ uranium có chất lượng. Nước Mỹ hùng mạnh phải đi khắp thế giới để mua uranium tốt. (Lúc đó) họ đã tìm được nó tại thuộc địa của Bỉ là Congo, trung Phi. Tóm lại, nếu không có sự trợ giúp của Bỉ, bán uranium của Congo cho USA thì sẽ không có bom hạt nhân, không có sự kết thúc sớm chiến tranh và không có siêu quyền lực.

Congo đã trả giá đắt cho tình trạng này. Nhiều nhà độc tài quân phiệt đã liên tục cai trị đất nước này cho tới ngày nay. Nhưng các quốc gia tạo ra vũ khí hạt nhân phải trả bằng cái giá đắt nhất. Một số nước vỡ nợ, một số chậm phát triển; ngay cả các nước giàu nhất cũng nhận được hàng núi nợ nần, nhân dân túng quẫn. *Không có* ngoại lệ. Cái giá của vũ khí hạt nhân còn là nhiều miền như đảo, sa mạc, sông, hồ, biển trên hành tinh của chúng ta không thể sinh sống được. Nhưng lẽ ra tình trạng còn có thể tệ hơn. Khi nhà vật lý hung hãn nhất thế giới, Edward Teller, thực hiện các tính toán về bom hydrogen, ông ta đã tiên đoán rằng bom sẽ biến bầu khí quyển thành lửa. Nhà vật lý



HÌNH 112 Một vụ nổ bom hạt nhân: cách thức tàn sát trẻ em trong quốc gia bị thả bom và huỷ hoại tương lai kinh tế của trẻ em trong quốc gia chế tạo bom.

đoạt giải Nobel Hans Bethe* đã hiệu chỉnh sai lầm này và chứng tỏ rằng việc đó không thể xảy ra. Tuy vậy, quân đội Mỹ vẫn cho nổ bom hydrogen ở đảo Bikini, một nơi rất Xem 166 xa nơi họ sinh sống. Nơi này có độ phóng xạ mạnh đến nỗi ngày nay nó vẫn còn gây ra nguy hiểm dù người ta chỉ cần bay ngang qua nó!

Người ta đã nhận ra rằng các vụ nổ thử nghiệm hạt nhân làm tăng độ phóng xạ của khí quyển xung quanh nơi nổ. Trong các nguyên tố sinh ra phóng xạ, ^{3}H được hấp thụ vào người thông qua nước uống, ^{14}C và ^{90}Sr thông qua thực phẩm, và ^{137}Cs bằng cả 2 đường. May mắn thay, sau này, mọi quốc gia đều đồng ý thực hiện các cuộc thử nghiệm hạt nhân ngầm dưới đất.

Phóng xạ gây nguy hiểm cho người vì nó phá vỡ các quá trình trong tế bào sống. Cách đo độ phóng xạ và tác dụng của phóng xạ trên sức khoẻ con người được kể ra chi tiết

* Hans Bethe (b. 1906 Strasbourg, d. 2005) là một nhà vật lý vĩ đại của thế kỷ 20, mặc dù ông là người đứng đầu nhóm nghiên cứu tạo ra trái bom nguyên tử đầu tiên. Ông nghiên cứu về Vật lý thể rắn, Vật lý hạt nhân và Vật lý thiên văn, giúp Richard Feynman trong việc phát triển Điện động lực học lượng tử. Lúc về già và từng trải hơn, ông nhiệt tình ủng hộ cho việc kiểm soát vũ khí; ông là nòng cốt trong việc thuyết phục thế giới ngừng các vụ nổ thử nghiệm hạt nhân trong khí quyển và do đó cứu được nhiều người tránh được bệnh ung thư.

BẢNG 15 Độ phóng xạ của một số chất.

Vật liệu	Hoạt độ Bq/kg
Không khí	*c.* 10^{-2}
Nước biển	10^{1}
Thân người	*c.* 10^{2}
Sữa bò	tối đa. 10^{3}
Kim loại ^{238}U nguyên chất	*c.* 10^{7}
Vật phát xạ tia α có độ phóng xạ cao	$> 10^{7}$
Carbon phóng xạ: ^{14}C (vật phát xạ tia β)	10^{8}
Vật phát xạ tia β và tia γ có độ phóng xạ cao	$> 10^{9}$
Mưa phóng xạ: ^{137}Cs, ^{90}Sr (vật phát xạ tia α)	$2 \cdot 10^{9}$
Polonium, một trong những vật liệu có độ phóng xạ mạnh nhất (α)	10^{24}

Trang 194 dưới đây.

Không chỉ bom hạt nhân mà cả các lò phản ứng hạt nhân hoà bình cũng gây ra nguy hiểm. Nguyên do đã được Frédéric Joliot và vợ ông là Irène, con gái của Pierre và Marie Curie phát hiện vào năm 1934: *sự phóng xạ nhân tạo*. Joliot–Curies đã khám phá ra rằng vật liệu bị chiếu xạ bằng tia α sẽ có tính phóng xạ. Họ đã nhận thấy rằng tia α đã biến đổi nhôm thành phosphor phóng xạ:



$$ {}^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{4}_{2}\alpha \rightarrow {}^{30}_{15}\mathrm{P} + {}^{30}_{15}\mathrm{n} \,. \qquad (60) $$

Đúng ra hầu như mọi vật liệu đều có tính phóng xạ khi được chiếu xạ bằng các hạt alpha, neutron hay tia γ. Kết quả là cất giữ chất phóng xạ là một việc khó khăn. Sau một thời gian tuỳ theo vật liệu và bức xạ thì hộp chứa chất phóng xạ nào cũng có tính phóng xạ. 'Sự lây nhiễm' chỉ ngừng khi còn rất ít chất phóng xạ.

Sự nguy hiểm của sự phóng xạ tự nhiên và nhân tạo là lý do chi phí của các lò phản ứng tăng vọt. Sau khoảng 30 năm hoạt động, lò phản ứng phải được tháo dỡ. Các mảnh phóng xạ phải được chứa trong các nơi được lựa chọn đặc biệt không thể xâm nhập, đồng thời sức khoẻ của công nhân phải được bảo đảm. Hiện nay trên thế giới có nhiều lò phản ứng cần được tháo dỡ. Nhiều công ty cung cấp dịch vụ với giá rất cao. Nhiều công ty vận hành trong những lĩnh vực rất gần với ranh giới của các hoạt động tội phạm và vì giác quan của người không thể phát hiện ra sự phóng xạ nên nhiều công ty đã vượt qua ranh giới này.

Đúng ra lò phản ứng hạt nhân quan trọng nhất lại không nguy hiểm cho con người: Trang 201 Mặt trời. Ta sẽ tìm hiểu nó ngay sau đây.

CÁC CÂU ĐỐ VUI VÀ LẠ VỀ HẠT NHÂN VÀ PHÓNG XẠ

Ngày nay, hiện tượng cộng hưởng từ hạt nhân thường được sử dụng để kiểm tra chất lượng thực phẩm. Các máy hiện đại có thể phát hiện nước cam có bị lẫn các nước ép từ các trái cây khác hay không và khi ép thì trái cây đã chín chưa. Các loại máy khác thì có thể kiểm tra xem rượu vang có được làm từ đúng loại nho không và tuổi của rượu là bao



HÌNH 113 Một máy kiểm tra chất lượng trái cây dựa vào hiện tượng cộng hưởng từ hạt nhân (© Bruker).

nhiêu.

* *

Máy cộng hưởng từ không gây ra nguy hiểm; nhưng chúng có một số tác dụng sinh học, Xem 171 như Peter Mansfield, một trong những nhà phát minh ra kỹ thuật này đã giải thích. Tác dụng đầu tiên bắt nguồn từ độ dẫn của máu. Khi máu trong động mạch chủ chảy xuyên qua từ trường sẽ gây ra một hiệu thế. Người ta đã quan sát được hiệu ứng này và nó có thể cản trở chức năng của tim với từ trường ở mức 7 T; các máy thông thường chỉ có từ trường khoảng 1.5 T nên không gây nguy hại gì. Tác dụng 2 bắt nguồn từ sự đảo từ trường. Một số người cảm nhận được sự đảo ngược này trong ngực và trong vai. Người ta vẫn chưa biết rõ về các kích thích dây thần kinh ngoại vi như vậy.

* *

Lượng bức xạ phóng xạ được gọi là *liều hấp thu phóng xạ*. Đơn vị liều hấp thu phóng xạ là *gray*: nó là độ phóng xạ kết lắng năng lượng 1 J trong 1 kg vật chất: 1 Gy = 1 J/kg. Một *sievert*, hay 1 Sv, là đơn vị liều phóng xạ *tương đương*; nó được điều chỉnh bằng cách gán cho mỗi loại mô một hệ số biểu diễn cho ảnh hưởng của sự kết lắng bức xạ trong mô đó. Từ 3 tới 5 sievert là liều chết người. Để có sự so sánh thì độ phóng xạ tự nhiên có trong cơ thể người tương đương với 0.2 mSv mỗi năm. Một ảnh X quang bình thường tương Xem 167 đương với 1 mSv; với CAT là 8 mSv. Với các trường hợp khác hãy xem Bảng 15.

Lượng chất phóng xạ được đo bằng số phân rã hạt nhân mỗi giây. Một phân rã/s là 1

BẢNG 16 Sự phơi chiếu phóng xạ của người và liều chiếu xạ tương đương.

Sự phơi chiếu	Liều tương đương
Sự phơi chiếu của người hằng ngày:	
Liều phơi chiếu trung bình đối với tia vũ trụ ở châu Âu	
ở mực nước biển	0.3 mSv/a
ở độ cao 3 km	1.2 mSv/a
Liều phơi chiếu trung bình (và tối đa) từ đất, không tính đến tác dụng của radon	0.4 mSv/a (2 mSv/a)
Liều hấp thu radon trung bình (và tối đa)	1 mSv/a (100 mSv/a)
Liều phơi chiếu trung bình do các nuclide phóng xạ	0.3 mSv/a
lượng tự nhiên của ^{40}K trong bắp thịt của người	10^{-4} Gy và 4500 Bq
lượng tự nhiên của Ra trong xương người	$2 \cdot 10^{-5}$ Gy và 4000 Bq
lượng tự nhiên của ^{14}C trong người	10^{-5} Gy
Tổng độ phơi chiếu trung bình (và cực đại) ở người	2 mSv/a (100 mSv/a)
Hoàn cảnh thông thường:	
Chụp X quang răng	*c.* 10 mSv liều tương đương
Chụp X quang phổi	*c.* 0.5 mSv liều tương đương
Chuyến bay ngắn 1 giờ (xem www.gsf.de/epcard)	*c.* 1 μSv
Chuyến bay ngang qua Đại tây dương	*c.* 0.04 mSv
Liều cực đại cho phép khi làm việc	30 mSv/a
Hút thuốc 60 điếu/ngày	26 tới 120 mSv/a
Liều phơi chiếu chết người:	
Do ion hoá	0.05 C/kg có thể chết người
Liều hấp thu	100 Gy=100 J/kg tử vong nếu từ 1 tới 3 ngày
Liều tương đương	hơn 3 Sv dẫn tới cái chết cho 50 % bệnh nhân không được điều trị

becquerel, hay 1 Bq. Cơ thể một người trưởng thành chứa 9 kBq. Quy định châu Âu đối với thực phẩm năm 2011, thay đổi trong khoảng từ 370 đến 600 Bq/kg. Độ phóng xạ của bom ở Hiroshima nằm trong khoảng từ 4 PBq đến 60 PBq, độ phóng xạ của thảm hoạ Chernobyl nằm trong khoảng từ 2 tới 12 EBq, lớn hơn từ 200 đến 500 lần. Số thảm hoạ phóng xạ ở Nga trong thập niên 1960 và 1970 cũng nhiều cỡ đó. Độ phóng xạ của thảm hoạ Fukushima tháng 03/2011 được ước tính trong khoảng 370 tới 630 PBq, trong tầm 10 đến 90 quả bom Hiroshima.

Đơn vị SI của độ phóng xạ bây giờ trở nên phổ biến trên thế giới; trong quá khứ, 1 sievert được gọi là 100 rem tức 'liều Röntgen tương ứng với người'; đơn vị SI của liều hấp thu, 1 gray, thay cho 100 rd hay Rad. Đơn vị SI của liều phơi chiếu bức xạ, 1 C/kg, thay cho đơn vị cũ 'röntgen', với $1\,\mathrm{R} = 2.58 \cdot 10^{-4}$ C/kg. Đơn vị SI becquerel thay cho curie (Ci), với 1 Ci = 37 GBq.



HÌNH 114 Một hình cũ của hồ Karachay và nhà máy điện hạt nhân đã thải đầy phóng xạ vào trong hồ (© Unknown).

* *

Không phải mọi tia γ đều có nguồn gốc phóng xạ. Vào năm 2000, một nhóm khoa học gia Ý khám phá ra rằng sấm sét cũng phát ra tia γ, có năng lượng lên tới 10 MeV. Cơ chế của hiện tượng này vẫn đang được nghiên cứu; hình như chúng có liên quan tới quá trình hình thành tia sét.

Xem 168

* *

Các phản ứng dây chuyền khá phổ biến trong thiên nhiên chứ không giới hạn trong lĩnh vực hạt nhân. *Lửa* là một phản ứng hoá học dây chuyền thí dụ như pháo bông. Trong cả 2 trường hợp, vật liệu cần nhiệt để cháy; nhiệt lượng này được lấy từ vùng kế cận đang cháy.

* *

Phóng xạ cực kỳ nguy hiểm đối với con người. Một thí dụ rõ nhất là plutonium. Chỉ cần 1 μg chất phát ra tia α này trong cơ thể người cũng đủ gây ra ung thư phổi. Một thí dụ nữa là polonium. Polonium 210 có trong lá thuốc lá nuôi trồng bằng phân bón nhân tạo. Thêm vào đó, lá thuốc lá còn lọc các chất phóng xạ khác từ không khí. Polonium, chì, potassium và các hạt nhân phóng xạ khác được tìm thấy trong thuốc lá là nguyên nhân chính của việc *thuốc lá gây ra ung thư*. Bảng 16 chứng tỏ rằng liều tương đương rất đáng kể và tính cho đến nay nó là liều hấp thu lớn nhất trong đời sống hằng ngày.

* *

Tại sao năng lượng hạt nhân lại là một nỗ lực đầy nguy hiểm? Bằng chứng rõ nhất là hồ Karachay gần Mayak, trong dãy Urals thuộc Nga. Chỉ trong vài năm, các nhà máy hạt nhân của vùng này đã biến hồ trở thành nơi nhiễm phóng xạ nhiều nhất trên Trái đất. Trong thập niên 1970, việc bách bộ trên bờ hồ trong 1 giờ cũng đủ gây ra chết người. Chất phóng xạ trong hồ trải ra trong một miền rộng lớn qua nhiều vụ nổ thảm khốc trong các thập niên 1950 và 1960, đã gây ra bệnh tật và sự chết chóc lan rộng. Nhiều tai hoạ được so sánh với thảm hoạ Chernobyl năm 1986; chúng được giữ bí mật. Ngày nay, khác với Hình 114, hồ đã được lấp một phần bằng bê tông – nhưng không phủ kín như đã được dự tính.

Xem 169

* *

Mọi loại chì đều có tính phóng xạ nhẹ, vì nó chứa đồng vị ^{210}Pb, một chất phát ra tia β. Đồng vị này do uranium và thorium trong đá, nơi khai thác chì, sinh ra. Đối với các thí nghiệm cần độ nhạy cao, như các thí nghiệm về neutrino, người ta cần các tấm chắn phóng xạ. Vật liệu che chắn tốt nhất là chì và dĩ nhiên là chì có độ phóng xạ thấp. Vì đồng vị ^{210}Pb có chu kỳ bán rã là 22 năm, có một cách là sử dụng chì *cũ*. Trong các thí nghiệm neutrino chính xác ở Gran Sasso, Italy, nhóm nghiên cứu sử dụng chì trong các mỏ thời La Mã, 2000 năm tuổi, để làm giảm các tín hiệu tạp nhiễu.

* *

Không phải mọi lò phản ứng hạt nhân đều là nhân tạo. Sự xuất hiện của các lò phản ứng hạt nhân *thiên nhiên* đã được Paul Kuroda tiên đoán năm 1956. Năm 1972, người ta tìm thấy lò đầu tiên. Ở Oklo, một vùng quê châu Phi thuộc Gabon, có một địa hình nổi tiếng nơi có nhiều uranium đến nỗi cách nay 2 tỷ năm đã có một lò phản ứng hạt nhân tự nhiên tự phát hình thành – mặc dù là nhỏ, với công suất ước tính 100 kW. Nó đã hoạt động trên 150 000 năm, trong thời gian lúc tỷ lệ uranium 235 là 3 % hay hơn, thoả yêu cầu của phản ứng dây chuyền. (Ngày nay, lượng uranium 235 trên Trái đất là 0.7 %.) Nước sông lân cận được đun sôi một cách tuần hoàn trong khoảng 30 phút; rồi lò nguội đi trong khoảng 2.5 giờ, vì nước cần để làm chậm neutron và duy trì phản ứng dây chuyền. Hệ thống này đã được nghiên cứu kỹ lưỡng, từ lịch sử địa chất cho tới sự thể hiện tính chân lý của các 'định luật' tự nhiên mà nó đã tạo ra. Các nghiên cứu cũng chứng tỏ rằng cách nay 2 tỷ năm cơ chế hoạt động cũng không khác với bây giờ.

* *

Lò phản ứng hạt nhân có nhiều cỡ. Loại lớn nhất được sử dụng trong nhà máy phát điện có thể sản xuất 1000 MW điện năng; loại nhỏ nhất được sử dụng trong vệ tinh thường sản xuất khoảng 10 kW. Mọi hoạt động đều không cần tiếp tế nhiên liệu trong thời gian từ 1 tới 30 năm.

* *

Sự phóng xạ cũng được sử dụng trong Pháp y học. Trong nhiều trường hợp rất khó thấy dấu vân tay. Có một phương pháp là đặt vật nghi vấn trong hơi iod phóng xạ hay sulphur dioxide phóng xạ. Hơi tác dụng với các chất trong dấu vân tay. Dấu vân tay trở nên phóng xạ. Quan sát các tín hiệu nhấp nháy của dấu vân tay – *phép chụp ảnh bằng sự tự phóng xạ* – sẽ cho ta ghi hình dấu vân tay bằng cách đặt một tấm film hay một máy dò trên vật nghi vấn.

* *

Khác với các hạt nặng, các hạt không khối lượng không thể phân rã hết. Lý do khá đơn giản: hạt không khối lượng không có thời gian, vì đường thế giới của chúng là 'null'. Một hạt không có thời gian thì không thể có chu kỳ bán rã. (Bạn có thể tìm ra một lập luận
Câu đố 124 s khác không?)

* *

Bức xạ năng lượng cao gây nguy hiểm cho người. Trong thập niên 1950, khi các cuộc thử nghiệm hạt nhân vẫn còn xảy ra trên mặt đất do đa số quân đội trên thế giới, các tướng lãnh bất chấp lời khuyến cáo của bác sĩ. Họ điều quân tới gần các vụ nổ để quan sát, và tệ hơn, còn ra lệnh cho binh sĩ di chuyển tới nơi nổ ngay sau khi vụ nổ xảy ra. Ta không cần bình luận về lệnh của mấy ông tướng này. Những binh sĩ không may này đã thấy một điều kỳ lạ: trong tia chớp của vụ nổ, họ có thể thấy xương của bàn tay và cánh tay
Câu đố 125 s của mình. Điều này đã diễn ra như thế nào?

* *

Năm 1958, một nhóm tội phạm đã cho nổ 6 quả bom hạt nhân trong bình lưu quyển. Một nhóm khác thực hiện một thí nghiệm tương tự năm 1961, rồi thêm nhiều vụ nữa của cả 2 nhóm trong năm 1962. (Để xem các tường trình và film, hãy tham khảo trang en.wikipedia.org/wiki/High_altitude_nuclear_explosion.) Kết quả của những vụ nổ này, *cực quang nhân tạo* đã được tạo ra trong đêm tiếp theo sau mỗi vụ nổ. Thêm nữa, xung điện từ của các vụ nổ đã phá huỷ các vệ tinh, thiết bị điện tử trên Trái đất, làm nhiễu loạn sự truyền thông vô tuyến, gây tổn thương cho người trên mặt đất, làm trục trặc nhiều nhà máy điện và phát tán một lượng lớn chất phóng xạ trên Trái đất – trong thời gian ít nhất là 14 năm sau đó. Vành đai bức xạ Van Allen quanh Trái đất bị ảnh hưởng nặng nề; người ta mong chờ vành đai Van Allen dưới thấp sẽ phục hồi trong vài trăm năm tới. May mắn cho loài người là sau năm 1962, hoạt động này đã bị ngăn chặn bởi các hiệp ước quốc tế.

* *

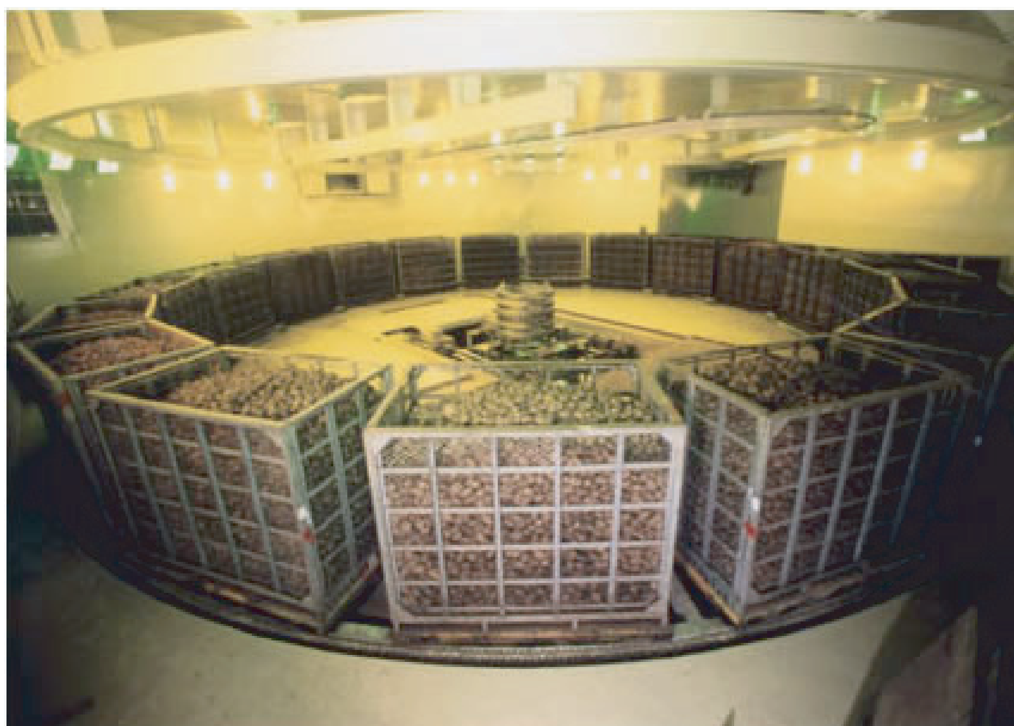
Bom hạt nhân là một vũ khí khủng khiếp. Để có cảm nhận về tính ác liệt và tội ác của
Xem 170 đám quân phiệt, hãy quan sát hình ảnh của các vụ nổ. Trong thập niên 1950 và 1960, thử nghiệm hạt nhân được thực hiện bởi lũ tướng tá không chịu lắng nghe các khuyến cáo của các bác sĩ và khoa học gia. Đám người này ra lệnh kích nổ bom trong không khí, làm nhiễm xạ cả bầu khí quyển, gây nguy hại cho toàn thể nhân loại; tệ hơn nữa, chúng còn ép binh sĩ tới nơi thử nghiệm sau vụ nổ chừng vài phút, đẩy họ tới cái chết do ung thư và bệnh bạch cầu. Chúng ta cần tránh xa lũ vô nhân này.

* *

Nhiều phương pháp xác định niên đại bằng phóng xạ được sử dụng để tính tuổi của
Trang 183 rượu và đang được cải tiến. Một vài phương pháp đã được liệt kê trong Bảng 14.

* *

Trong một số ít trường hợp, thời gian phân rã phóng xạ có thể bị thay đổi do các ảnh hưởng bên ngoài. Sự bắt electron, được quan sát trong beryllium-7, là một trong các thí dụ hiếm hoi về sự thay đổi này, với sự thay đổi lên tới 1.5 %, tuỳ theo môi trường hoá



HÌNH 115 Khoai được chiếu xạ ở Shihorocho Agricultural Cooperative Isotope Irradiation Center ở Nhật. Chúc ngon miệng!

học. Thời gian phân rã đối với cùng một đồng vị đã thay đổi 1/100 dưới áp suất 27 GPa. Mặt khác, các hiệu ứng này có thể bỏ qua đối với các hạt nhân có khối lượng lớn hơn.
Xem 159 Một vài nuclide cũng cho các hiệu ứng tương tự nhưng nhỏ hơn.

Hiệu ứng thú vị nhất về hạt nhân là sự phân hạch do laser của ^{238}U, xảy ra khi laser
Trang 259 có cường độ rất cao.

* *

Cả tia γ và bức xạ neutron đều có thể được sử dụng để ghi hình ảnh các vật mà không làm hỏng chúng. Tia γ đã được sử dụng để ghi hình ảnh bên trong của mặt nạ Tutankhamun. Bức xạ Neutron, xuyên qua kim loại dễ dàng giống như các vật liệu khác, đã được sử dụng để ghi hình, ngay ở tốc độ của film, các quá trình bên trong động cơ xe hơi.

* *

Tia γ được sử dụng ở châu Á để chiếu xạ thực phẩm. Điều này bị cấm ở một số quốc gia khác như ở Đức. Tia γ được sử dụng để chiếu xạ cho khoai, ngăn nó nảy mầm. Thí dụ được cho trong Hình 115. Tốt hơn ta không nên làm việc ở đó. Đúng ra có trên 30 quốc gia cho phép chiếu xạ thực phẩm. Hầu như mọi gia vị trên thế giới đều được xử lý bằng tia γ, để giữ được lâu hơn. Tuy vậy, người tiêu thụ ít được thông báo về điều này.

* *

Tia β 10 MeV và tia γ được sử dụng trong nhiều nhà máy lớn trên thế giới để khử trùng thiết bị y tế, dụng cụ y khoa, đồ chơi, bàn ghế, diệt nấm mốc trong sách vở và thức ăn gia súc. (Xem www.bgs.eu.)

* *

Các đồng vị không phóng xạ ^{2}H – thường được viết đơn giản là D – và ^{18}O có thể được sử dụng để đo năng lượng sinh ra trong cơ thể người rất dễ dàng. Chỉ cần cho người đó uống một ly nước đánh dấu kép và thu mẫu nước tiểu của họ trong vài tuần. Sử dụng một khối phổ kế người ta có thể xác định năng lượng tiêu thụ của người đó. Tại sao? Nước được đánh dấu kép $^{2}H_2{}^{18}O$ được cơ thể xử lý theo 3 cách. Đồng vị oxygen được thở ra theo $C^{18}O_2$ hay được khử thành $H_2{}^{18}O$; đồng vị hydrogen được khử thành $^{2}H_2O$. Các phép đo đối với nước tiểu cho ta cách xác định carbon dioxide, do đó xác định được lượng thực phẩm đã chuyển hoá và năng lượng được tạo ra.

Năng lượng tiêu thụ của người thường được tính bằng joule/ngày. Thí nghiệm cho ta thấy rằng những người leo núi tiêu thụ 20 000 kJ/ngày và người đi xe đạp tiêu thụ 30 000 kJ/ngày đều là các nhà thể thao đúng nghĩa nhất. Người trung bình chỉ sản xuất 6 000 kJ/ngày.

* *

Tỷ lệ đồng vị ^{18}O trong nước đại dương của Trái đất có thể được sử dụng để tìm ra xuất xứ của nước. Điều này đã được đề cập trong Quyển 1 của bộ sách này.

Quyển I, trang 369

* *

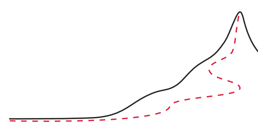
Nhiều hạt nhân có hình dạng dao động. Việc tính toán các dao động này cũng là một chủ đề nghiên cứu riêng. Thí dụ như khi một hạt nhân hình cầu dao động, nó có thể chuyển động theo 3 trục trực giao với nhau. Khi dao động nhỏ một hạt nhân hình cầu hoạt động như một dao tử điều hoà 3 chiều. Điều thú vị là nhóm đối xứng của dao tử là SU(3), giống như đối xứng đặc trưng cho tương tác hạt nhân mạnh. Tuy vậy, hai đối xứng này không có liên hệ với nhau – theo kiến thức khoa học hiện nay. Dù vậy, một mối liên hệ có thể xuất hiện trong tương lai.

Quyển VI, trang 275

Tóm tắt về hạt nhân

Hạt nhân nguyên tử được cấu tạo từ proton và neutron. Đường kính của chúng nằm trong khoảng từ 1 tới vài femtometre và chúng có moment động lượng. Moment động lượng của chúng nếu > 0, cho phép chúng ta tạo ra các ảnh cộng hưởng từ. Hạt nhân có thể hình cầu hay ellipsoid, có thể bị kích thích lên tới mức năng lượng cao và hình dạng có thể dao động. Hạt nhân có màu sắc được xác định bằng quang phổ của chúng. Hạt nhân có thể phân rã, tán xạ, vỡ ra và tương tác với nhau. Phản ứng hạt nhân có thể ứng dụng làm bom, nhà máy điện, tạo đột biến sinh học và tìm hiểu cơ thể người. Như ta sẽ thấy sau đây, tương tác hạt nhân là nền tảng hoạt động của Mặt trời và cũng là nền tảng hiện hữu của chúng ta.





Chương 6
Mặt trời, ngôi sao và sự ra đời của vật chất

> Lernen ist Vorfreude auf sich selbst.**
> Peter Sloterdijk

Vật lý hạt nhân là phần bạo liệt nhất của Vật lý. Nhưng bỏ qua hình ảnh không đẹp này, Vật lý hạt nhân cũng cho ta một số nét quyến rũ: nhờ thám hiểm hạt nhân, ta biết cách tìm hiểu Mặt trời, ngôi sao, vũ trụ xa xưa, sự ra đời của vật chất và lịch sử của riêng ta. Xem 172

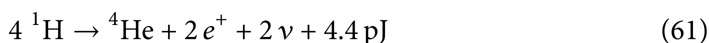
Hạt nhân bao gồm proton và neutron. Vì proton mang điện dương nên chúng đẩy nhau. Trong hạt nhân, proton phải liên kết với nhau bằng một lực đủ mạnh để giúp chúng chống lại lực đẩy điện từ. Đây là *tương tác hạt nhân mạnh*; cần có nó để tránh cho hạt nhân bị nổ tung. Tương tác hạt nhân mạnh là tương tác mạnh nhất trong 4 tương tác của thiên nhiên – các tương tác khác là tương tác hấp dẫn, tương tác điện từ và tương tác hạt nhân yếu. Dù tương tác có mạnh, ta vẫn không cảm nhận được nó trong cuộc sống hằng ngày vì tầm tác dụng của nó bị giới hạn trong phạm vi vài femtometre, tức là vài đường kính của proton. Dù bị giới hạn, tương tác mạnh sẽ kể cho chúng ta những câu chuyện rất hay về ánh lửa của Mặt trời và về cấu tạo của cơ thể chúng ta.

Mặt trời

Hiện nay, Mặt trời đang phát ra 385 YW ánh sáng. Năng lượng này do Claude Pouillet đo lần đầu tiên vào đầu thế kỷ 19. Mỗi năm, năng lượng này đủ để làm tan chảy một thể tích băng lớn hơn thể tích Trái đất 500 lần. Câu đố 126 e

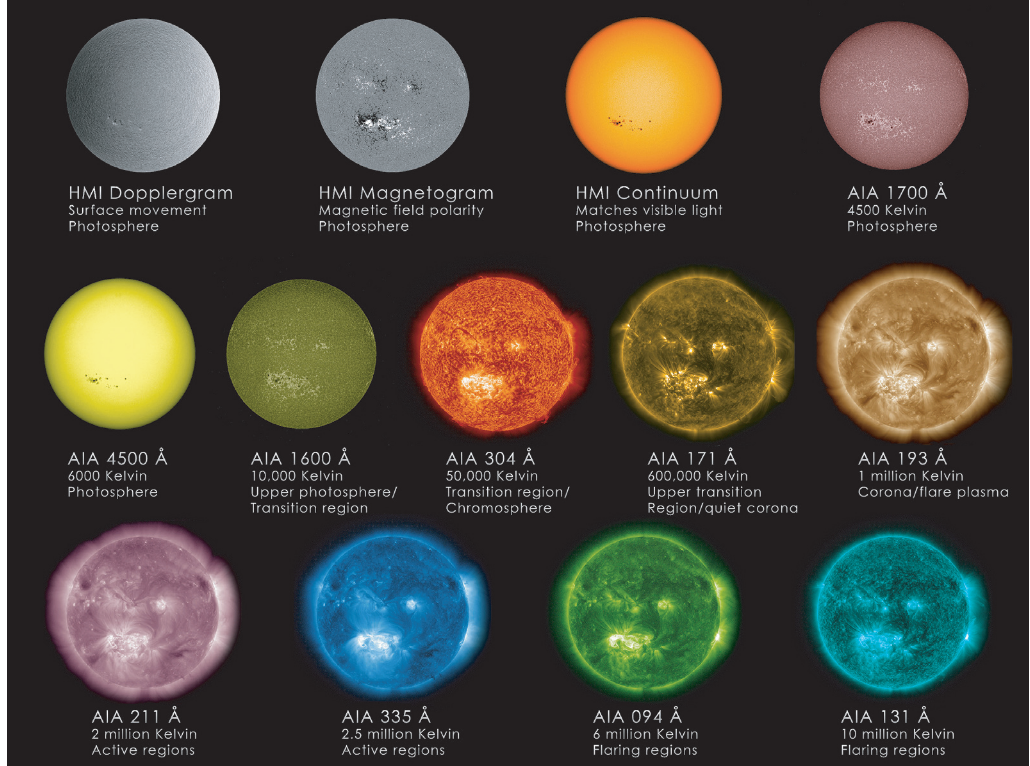
Năng lượng khổng lồ này từ đâu mà có? Nếu nó đến từ than thì Mặt trời đã ngừng sáng sau vài ngàn năm. Khi hiện tượng phóng xạ được khám phá, các nhà nghiên cứu đã xét thử khả năng mà quá trình này có thể diễn ra trong tâm Mặt trời. Tuy vậy, dù hiện tượng phóng xạ – hay quá trình phân hạch được khám phá sau đó – có thể giải phóng nhiều năng lượng hơn hiện tượng cháy hoá học, cấu tạo của Mặt trời – phần lớn là hydrogen và helium – không cho điều đó xảy ra.

Nguồn gốc của năng lượng do Mặt trời phát xạ đã được Fritz Houtermans, Carl Friedrich von Weiszäcker và Hans Bethe xác định vào năm 1929: Mặt trời phát sáng nhờ *sự dung hợp hydrogen*. Sự dung hợp là sự tạo thành một hạt nhân lớn từ các hạt nhân nhỏ hơn. Trong Mặt trời, phản ứng dung hợp chính là Xem 173



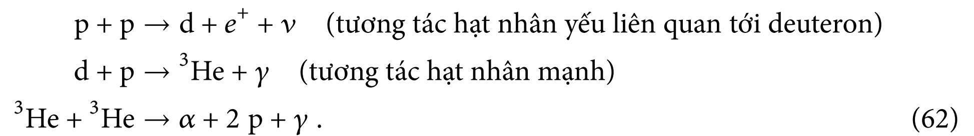
$$4\,{}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + 2\,e^{+} + 2\,\nu + 4.4\,\mathrm{pJ} \qquad (61)$$

** 'Học tập là niềm vui đã được đoán trước của chính bạn.'



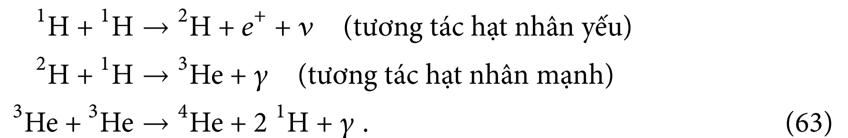
HÌNH 116 Mặt trời phát ra bức xạ có bước sóng khác nhau. Ta nên nhớ rằng tất cả các hình ảnh này được hiển thị đơn sắc, không đúng với thực tế, chỉ để cho hình dễ nhìn hơn. Bộ hình này không gồm hình có bước sóng vô tuyến, cũng cho thấy các vết đen Mặt trời, nhưng với độ phân giải thấp hơn. (Courtesy NASA)

biến đổi hạt nhân hydrogen thành hạt nhân helium. Phản ứng này được gọi là *chu trình hydrogen–hydrogen* hay *chu trình p–p*. Chu trình hydrogen là kết quả của một chu trình liên tục của 3 phản ứng hạt nhân riêng biệt:



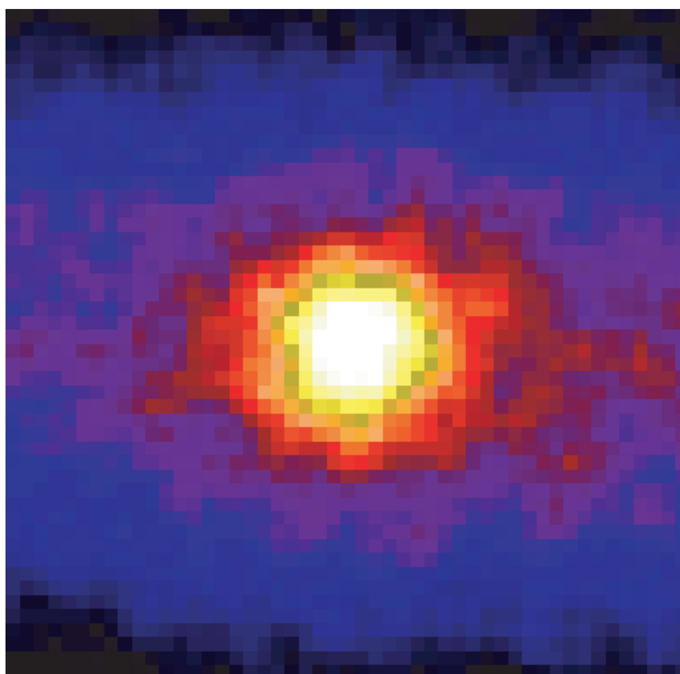
$$\begin{aligned} \mathrm{p} + \mathrm{p} &\rightarrow \mathrm{d} + e^{+} + \nu \quad \text{(tương tác hạt nhân yếu liên quan tới deuteron)} \\ \mathrm{d} + \mathrm{p} &\rightarrow {}^{3}\mathrm{He} + \gamma \quad \text{(tương tác hạt nhân mạnh)} \\ {}^{3}\mathrm{He} + {}^{3}\mathrm{He} &\rightarrow \alpha + 2\,\mathrm{p} + \gamma\,. \end{aligned} \tag{62}$$

Ta cũng có thể viết chu trình p-p như sau



$$\begin{aligned} {}^{1}\mathrm{H} + {}^{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{2}\mathrm{H} + e^{+} + \nu \quad \text{(tương tác hạt nhân yếu)} \\ {}^{2}\mathrm{H} + {}^{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{3}\mathrm{He} + \gamma \quad \text{(tương tác hạt nhân mạnh)} \\ {}^{3}\mathrm{He} + {}^{3}\mathrm{He} &\rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + 2\,{}^{1}\mathrm{H} + \gamma\,. \end{aligned} \tag{63}$$

Tổng hợp lại, 4 proton hợp thành một hạt nhân helium hay hạt alpha; nếu ta kể luôn electron thì có thể nói rằng 4 nguyên tử hydrogen hợp thành một nguyên tử helium.



HÌNH 117 Mặt trời cũng phát ra neutrino. Cường độ của chúng được biểu diễn ở đây bằng một hình có màu không đúng thực tế, thu được trên cả Trái đất từ một thí nghiệm dưới lòng đất, có độ phơi chiếu 503 ngày, với năng lượng từ 7 tới 25 MeV. Tuy vậy, do các quá trình tán xạ, điểm sáng to hơn kích thước Mặt trời nhiều lần. (© Robert Svoboda)

Quá trình dung hợp phát ra neutrino và ánh sáng có năng lượng tổng cộng là 4.4 pJ (26.7 MeV). Đây là năng lượng làm cho Mặt trời phát sáng. Phần lớn năng lượng này là quang năng; khoảng 10 % là của neutrino. Phần năng lượng sau được minh hoạ trong Hình 117.

Phản ứng đầu tiên trong phương trình (62) bắt nguồn từ tương tác hạt nhân yếu. Sự biến nguyên tố và sự phân rã thông thường β này có giản đồ Feynman bậc nhất giống nhau. Tương tác yếu khiến cho sự dung hợp không xảy ra quá nhanh và Mặt trời vẫn còn chiếu sáng trong một khoảng thời gian. Thật vậy, trong Mặt trời, với cường độ sáng Xem 174 385 YW, chỉ có 10^{38} phản ứng dung hợp/s. Điều này cho phép chúng ta suy ra là Mặt trời sẽ còn sống nhiều Ga (Gigayear) nữa trước khi nhiên liệu bị cạn đi.

Tính đơn giản của chu trình hydrogen-hydrogen không cho thấy hết nét quyến rũ của quá trình. Tính trung bình, proton trong tâm Mặt trời chuyển động với tốc độ 600 km/s. Chỉ khi nào chúng va chạm trực diện thì phản ứng hạt nhân mới có thể xảy ra; trong các trường hợp khác, lực tĩnh điện giữa các proton giữ cho chúng xa nhau. Trung bình đối với một proton, một va chạm trực diện chỉ xảy ra 1 lần trong 7 tỷ năm! Tuy vậy, số va chạm của proton trong Mặt trời nhiều đến nỗi mỗi giây có 4 triệu tấn hydrogen bị đốt thành helium. Phản ứng thứ nhì của chu trình proton xảy ra trong vài giây và phản ứng thứ 3 mất khoảng 1 triệu năm.

Phản ứng dung hợp (62) xảy ra trong tâm Mặt trời, tức là *lõi Mặt trời*. May mắn cho chúng ta là các photon γ có năng lượng cao được tạo ra trong tâm Mặt trời được 'làm chậm lại' do các lớp bên ngoài của Mặt trời, cụ thể là *vùng bức xạ*, *vùng đối lưu* với chuyển động bên trong phức tạp của nó, và *quang quyển*, lớp mỏng mà chúng ta nhìn thấy. Lớp sau cùng, khí quyển, ban ngày không thể nhìn thấy trừ lúc nhật thực toàn phần, như trong Hình 120. Nói chính xác hơn, khí quyển Mặt trời bao gồm *vùng có nhiệt độ nhỏ*



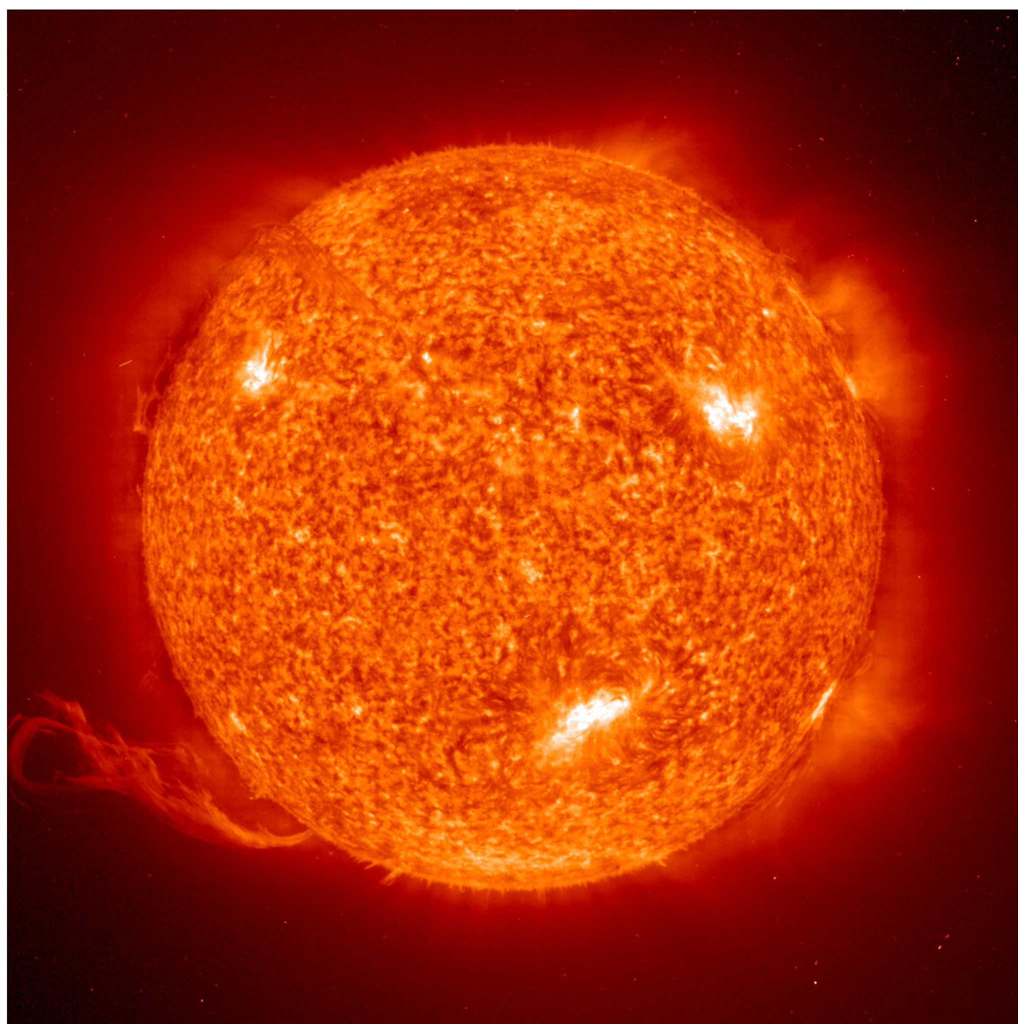
HÌNH 118 Một ảnh của Mặt trời ở bước sóng khả kiến khoảng 677 nm, do tàu thăm dò không gian SOHO ghi được, cho ta thấy một vài vết đen Mặt trời (ESA và NASA).

nhất, *sắc quyển*, *vùng chuyển tiếp*, *nhật hoa* và *nhật quyển*.

Trong quá trình làm chậm phức tạp bên trong Mặt trời, các photon γ được biến đổi tuần tự thành các photon khả kiến, chủ yếu là do tán xạ. Sự tán xạ cần thời gian. Trong Mặt trời, nó khá lâu: ánh sáng Mặt trời hôm nay là ánh sáng đã được tạo ra vào thời của Xem 175 Neandertal: cách nay ước chừng 170 000 năm. Nói cách khác, tốc độ ánh sáng hiệu dụng trung bình trong Mặt trời là vào khoảng 300 km/năm! Sau đó 170 000 năm, photon mất 8.3 phút để đi tới Trái đất và duy trì sự sống cho mọi cây cỏ và động vật.

Chuyển động trong và trên Mặt trời

Nhiệt độ trong lõi Mặt trời khoảng 15 MK. Trên bề mặt, nhiệt độ khoảng 5.8 kK. (Tại sao Quyển III, trang 148 nó lạnh hơn?) Vì trên mặt lạnh hơn trong trung tâm nên Mặt trời không phải là một quả cầu thuần nhất mà có cấu trúc không thuần nhất. Nếu bạn muốn cảm nhận nét tráng lệ

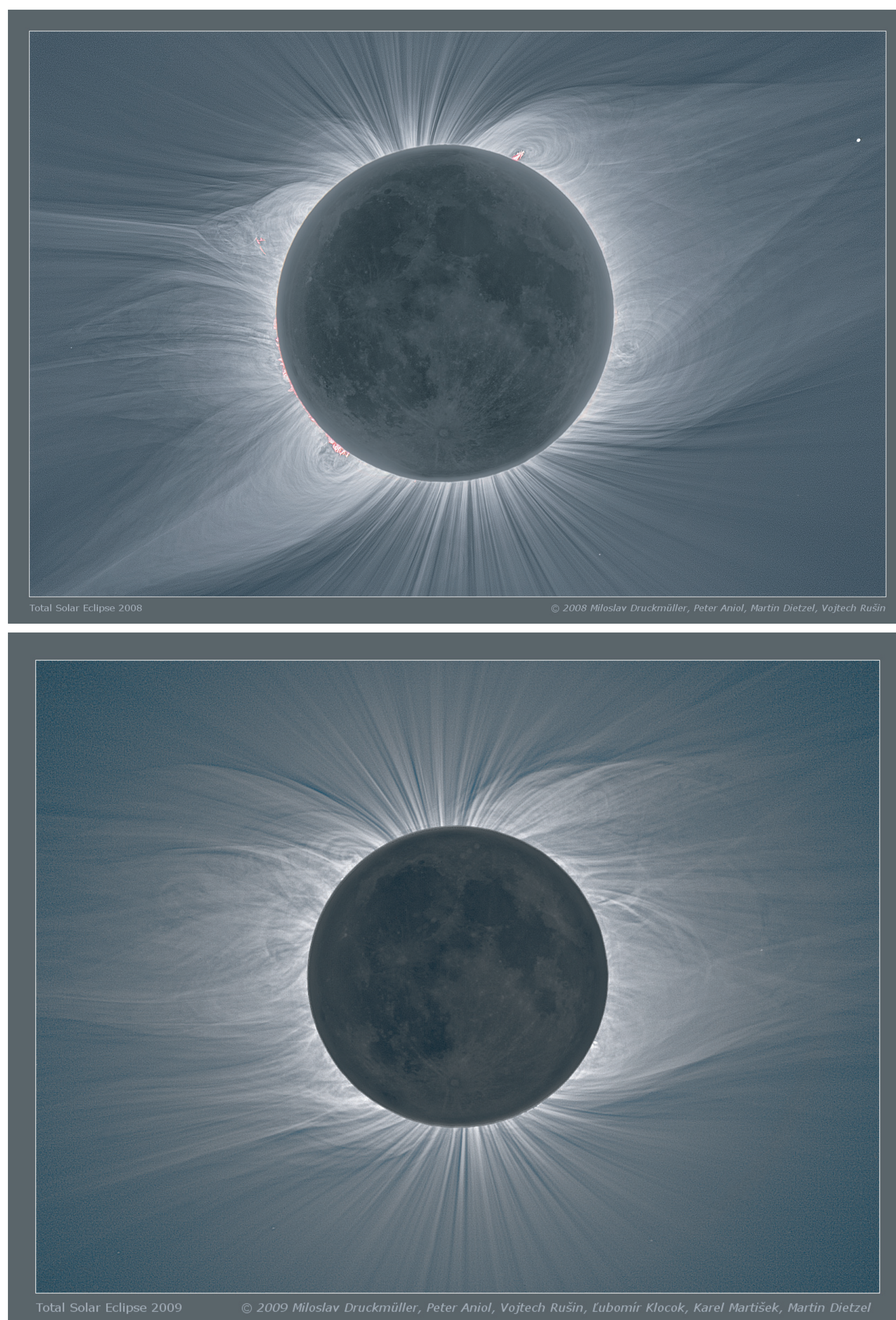


HÌNH 119 Một ảnh của Mặt trời do SOHO ghi được, ở bước sóng cực tím 30.4 nm và như vậy màu sẽ không thực, cho ta thấy các tai lửa của Mặt trời (ESA và NASA).

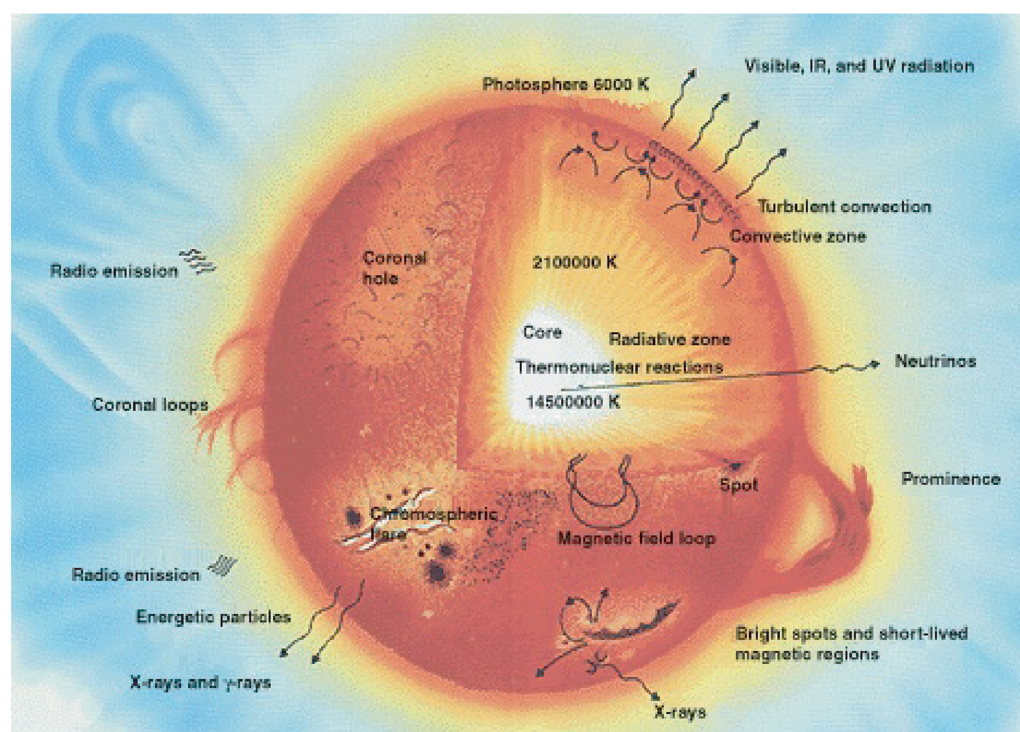
của Mặt trời hãy xem một video tuyệt vời tại www.youtube.com/watch?v=ipvfwPqh3V4 cho thấy bề mặt của nó trong thời gian 2 tuần. Sự không thuần nhất của Mặt trời bắt nguồn từ các quá trình đối lưu do gradient nhiệt độ gây ra. Sự đối lưu cùng với chuyển động quay quanh trục sẽ mang lại những cấu trúc lộng lẫy như ta thấy trong Hình 119 và những hình tiếp theo: *sự phún xuất của Mặt trời*, bao gồm chớp sáng Mặt trời và sự phun trào nhật hoa, và *các điểm đen của Mặt trời*.

Tóm lại, Mặt trời không hề tĩnh tại. Vật chất trong Mặt trời luôn chuyển động. Có một cách ấn tượng để cảm nhận các quá trình mãnh liệt trong Mặt trời là xem film trong Hình 122, thể hiện sự tiến hoá của *chớp sáng Mặt trời*. Nhiều quá trình phún xuất, như đã thấy trong góc dưới bên trái của Hình 119 hay trong Hình 123, vật chất được phun mạnh vào không gian. Khi đám vật chất này đến Trái đất,* bị loãng đi sau một hành trình

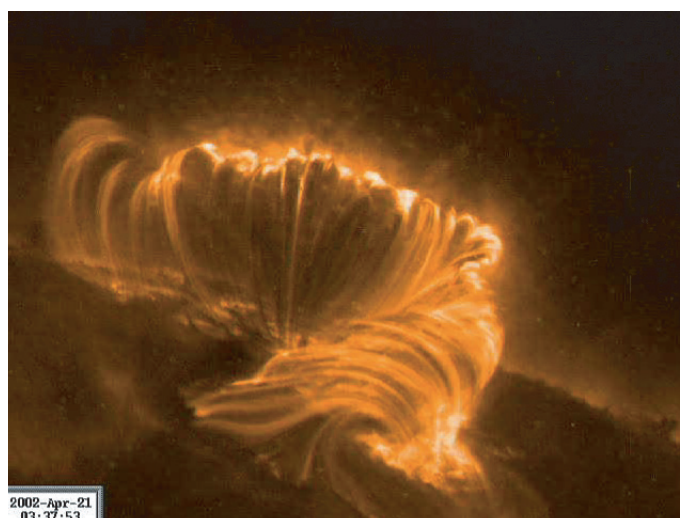
* Hành tinh cũng có thể ảnh hưởng tới gió Mặt trời; vấn đề này vẫn còn trong vòng nghiên cứu.



HÌNH 120 Các chi tiết phức tạp của Nhật hoa, được ghi lại trong lúc nhật thực toàn phần năm 2008 ở Bor Udzuur, Mông Cổ và nhật thực toàn phần năm 2009 ở quần đảo Marshall. Các ảnh này là ảnh tổng hợp bằng máy tính từ nhiều ảnh được chọn ra để tái tạo lại một ảnh gần giống với một ảnh được quan sát bằng một kính thiên văn nhỏ. Ảnh đầu tiên bao gồm các tai lửa. Các hình này cũng cho ta định vị các cực của Mặt trời. (Hình trên © Miloslav Druckmüller, Martin Dietzel, Peter Aniol, Vojtech Rušin; hình dưới © Miloslav Druckmüller, Peter Aniol, Vojtech Rušin, Ľubomír Klocok, Karel Martišek và Martin Dietzel)

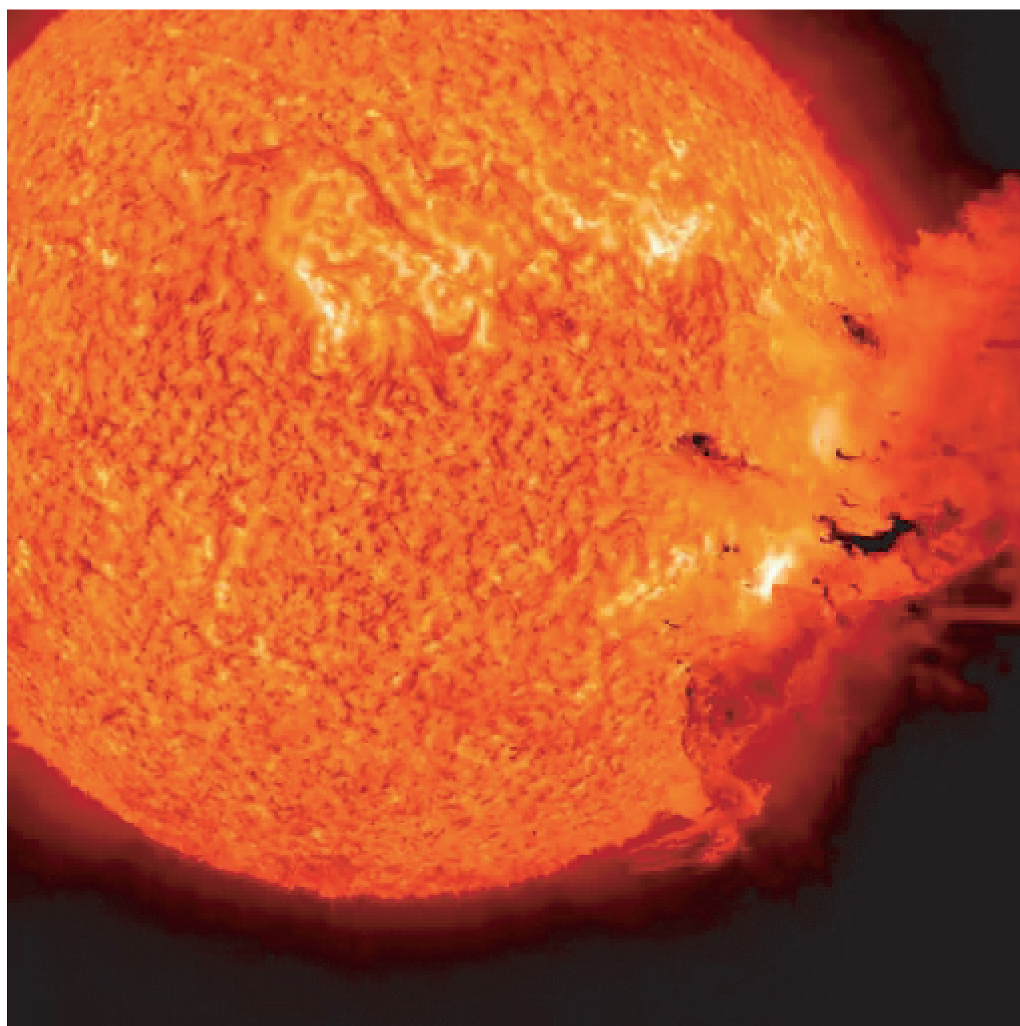


HÌNH 121 Một hình vẽ bên trong Mặt trời (courtesy NASA).



HÌNH 122 Sự tiến hoá của một chớp sáng Mặt trời được quan sát từ vệ tinh TRACE (QuickTime film courtesy NASA).

dài, sẽ ảnh hưởng tới môi trường sống của chúng ta. Những *cơn bão Mặt trời* như vậy có thể ảnh hưởng tới thượng tầng khí quyển và có thể kích khởi các cơn bão thông thường trên Trái đất. Các ảnh hưởng khác của bão Mặt trời là sự hình thành cực quang và làm



HÌNH 123 Một phun trào nhật hoa ngoạn mục được quan sát vào ngày 7/6/2011 từ vệ tinh SDO (Solar Dynamic Observatory) (QuickTime film courtesy NASA).

chim di trú lạc hướng; điều này xảy ra trong các cơn bão Mặt trời cực mạnh vì từ trường của Trái đất bị nhiễu loạn. Một sự kiện nổi tiếng do bão Mặt trời gây ra là sự mất điện của một vùng rộng lớn ở Canada tháng 03/1989. Dòng các hạt tích điện của Mặt trời đã gây ra dòng điện cảm ứng lớn trong dây dẫn điện, làm hỏng cầu chì, phá hỏng lưới điện, làm nhà máy điện ngừng hoạt động. Hàng triệu người Canada không có điện và ở những vùng xa xôi hẻo lánh người ta phải mất 2 tuần để phục hồi việc cung cấp điện. Do cái lạnh của mùa đông cùng với một tai nạn xe điện vì mất điện, có trên 80 người tử thương. Sau đó, người ta đã tái thiết kế lưới điện để cho nó có thể chống được các tai hoạ như vậy.

Tại sao nhiệt độ bề mặt của Mặt trời là 6 kK, trong khi *nhật hoa* – lớp xạ khí mỏng từ trong và chung quanh Mặt trời mà ta có thể thấy được trong nhật thực toàn phần, trong Hình 120 – lại đạt được từ 1 đến 3 triệu Kelvin, cùng với các đỉnh định xứ trong chớp sáng lên tới 100 MK? Trong hậu thế kỷ 20, bằng cách sử dụng vệ tinh, người ta đã biết nguyên nhân nằm ở từ trường của Mặt trời; thông qua các dòng vật chất cuồng nộ, từ năng được truyền cho nhật hoa tại những nơi mà ống thông lượng tạo thành các gút, trên các điểm sáng ở bên trái của Hình 119 hay trên các điểm đen trong Hình 118. Kết quả là các hạt của nhật hoa được gia tốc và nung nóng nó lên tới nhiệt độ cao hơn nhiệt độ bề mặt hàng ngàn lần.

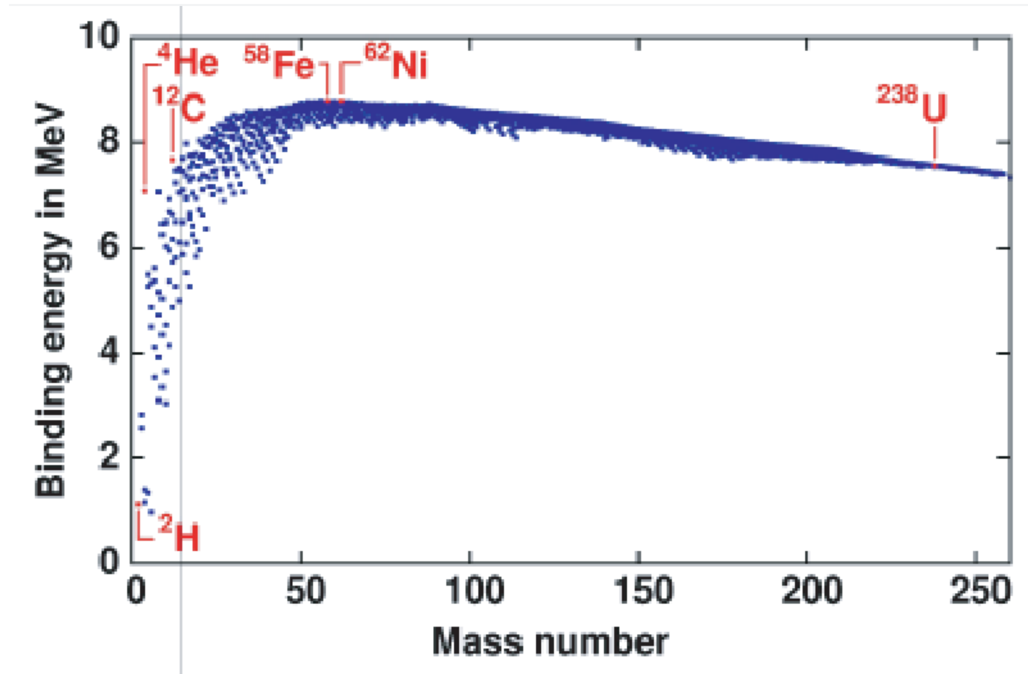
Tại sao các ngôi sao lại sáng?

> “Các vì sao không lấp lánh đó hay sao? Tôi là người duy nhất trên thế gian biết rõ điều này.”
> Friedrich (Fritz) Houtermans *

Sao chiếu sáng nhờ sự dung hợp. Khi 2 hạt nhân nhẹ dung hợp thành một hạt nhân nặng hơn, có nhiều năng lượng toả ra vì các nucleon trung bình liên kết với nhau mạnh hơn. Độ lợi năng lượng này tiếp diễn cho đến khi hạt nhân sắt ^{56}Fe được tạo ra. Đối với các hạt nhân trên giới hạn này như ta thấy trong Hình 124, năng lượng liên kết đối với mỗi nucleon lại giảm đi; như vậy sự dung hợp không còn sinh năng lượng nữa. Hoá ra các hạt nhân nặng hơn trên Trái đất và trong vũ trụ được tạo ra nhờ hiện tượng *bắt neutron*. Tóm lại, hạt nhân nhẹ hơn sắt được tạo ra nhờ sự dung hợp, hạt nhân nặng hơn sắt được tạo ra nhờ sự bắt neutron. Với cùng một lý do, hạt nhân toả ra năng lượng nhờ sự *dung hợp* khi kết quả là hạt nhân nhẹ hơn sắt, và toả ra năng lượng nhờ sự *phân hạch* khi khởi đầu từ các hạt nhân nặng hơn sắt.

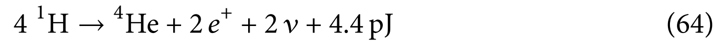
Ta có thể phân biệt các ngôi sao khác nhau trên bầu trời ** dựa vào loại phản ứng hạt nhân chiếm ưu thế. Phần lớn các ngôi sao, đặc biệt là sao trẻ và nhẹ, đang dung hợp hạt nhân hydrogen. Nhưng đó chưa phải là tất cả. Có nhiều loại dung hợp hydrogen: chu trình hydrogen–hydrogen (p–p) trực tiếp, như trong Mặt trời và nhiều loại sao khác; chu trình CNO hay chu trình Bethe-Weizsäcker.

* Friedrich Houtermans (1903–1966) là một trong những nhà vật lý có cuộc sống đa dạng nhất trong thời đại của ông. Ông đã sống ở Áo, Anh, Nga, Đức và Mỹ. Ông đã được Sigmund Freud phân tích tâm lý, bị NKWD bỏ tù, tra tấn ở Nga, rồi bị Gestapo ở Đức bỏ tù, sau đó chuyển sang nghiên cứu sự phân hạch. Ông làm việc với George Gamow và Robert Atkinson.
** Để tìm ra ngôi sao nào ở trên bầu trời của bạn lúc này, hãy vào trang www.surveyor.in-berlin.de/himmel.



HÌNH 124 Giá trị của năng lượng liên kết đối với mỗi nucleon trong hạt nhân. Vùng bên trái của cực đại, tại vị trí của ^{58}Fe, là vùng mà sự dung hợp cho nhiều năng lượng có thể xảy ra; vùng bên phải là vùng mà sự phân hạch có thể xảy ra (© Max Planck Institute for Gravitational Physics).

Trang 201 Chu trình hydrogen đã được mô tả ở trên và có thể tóm tắt như sau



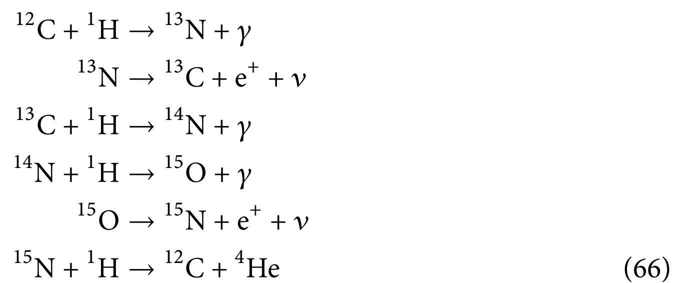
$$4\,{}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + 2\,e^{+} + 2\,\nu + 4.4\,\mathrm{pJ} \qquad (64)$$

hay một cách tương đương,



$$4\,\mathrm{p} \rightarrow \alpha + 2\,e^{+} + 2\,\nu + 26.7\,\mathrm{MeV}\ . \qquad (65)$$

Nhưng đây chưa phải là phản ứng duy nhất. Nếu sao có chứa nhân nặng hơn, phản ứng dung hợp hydrogen sẽ sử dụng các nguyên tố này như chất xúc tác. Điều này xảy ra trong chu trình Bethe-Weizsäcker hay chu trình CNO, diễn ra như sau



$$\begin{aligned}
{}^{12}\mathrm{C} + {}^{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{13}\mathrm{N} + \gamma \\
{}^{13}\mathrm{N} &\rightarrow {}^{13}\mathrm{C} + \mathrm{e}^{+} + \nu \\
{}^{13}\mathrm{C} + {}^{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{14}\mathrm{N} + \gamma \\
{}^{14}\mathrm{N} + {}^{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{15}\mathrm{O} + \gamma \\
{}^{15}\mathrm{O} &\rightarrow {}^{15}\mathrm{N} + \mathrm{e}^{+} + \nu \\
{}^{15}\mathrm{N} + {}^{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{12}\mathrm{C} + {}^{4}\mathrm{He} \qquad (66)
\end{aligned}$$

Kết quả sau cùng *giống như* chu trình hydrogen, cả hạt nhân lẫn năng lượng. Chu trình Bethe-Weizsäcker nhanh hơn dung hợp hydrogen nhưng cần nhiệt độ cao hơn vì proton phải vượt qua rào năng lượng cao hơn trước khi tác dụng với carbon hay nitrogen. (Tại sao?) Trong Mặt trời, do nhiệt độ tương đối thấp, vài chục triệu kelvin, chu trình Bethe-Weizsäcker (và dạng khác của nó) không quan trọng bằng chu trình hydrogen.

Câu đố 127 s

Chu trình proton và chu trình Bethe-Weizsäcker không phải là các khả năng duy nhất. Các sao nặng và già hơn Mặt trời cũng có thể chiếu sáng nhờ các phản ứng dung hợp khác. Đặc biệt, khi không còn hydrogen thì các sao sẽ *đốt helium*:



$$3\,{}^{4}\mathrm{He} \rightarrow {}^{12}\mathrm{C}\,. \qquad (67)$$

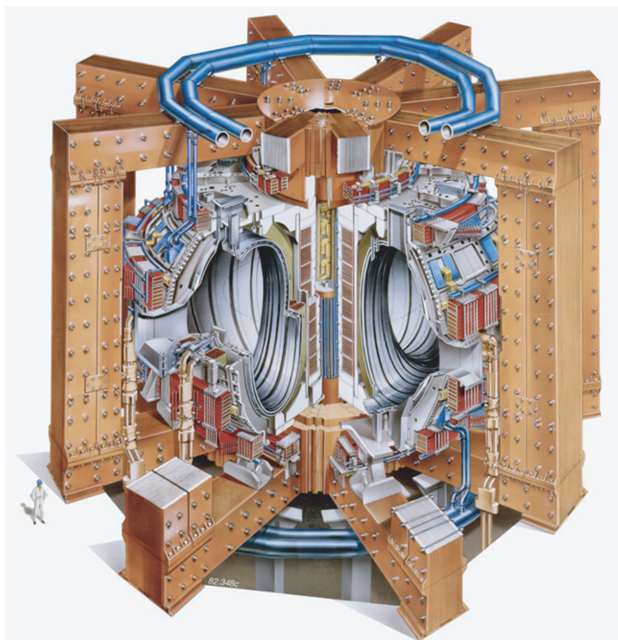
Phản ứng dung hợp này, còn gọi là *quá trình 3-α*, có xác suất nhỏ vì nó phụ thuộc vào 3 hạt ở cùng một điểm trong cùng thời điểm. Thêm nữa, một lượng nhỏ carbon biến đi rất nhanh thông qua phản ứng $\alpha + {}^{12}\mathrm{C} \rightarrow {}^{16}\mathrm{O}$. Tuy nhiên vì ^{8}Be không bền nên phản ứng 3 hạt alpha là cách duy nhất để vũ trụ tạo ra carbon. Điều kỳ dị này được ủng hộ chỉ vì một lý do: carbon có một trạng thái kích thích 7.65 MeV, lớn hơn tổng khối lượng của các hạt alpha là 0.3 MeV; trạng thái kích thích này sẽ *tăng cường cộng hưởng* xác suất của phản ứng 3 hạt. Chỉ bằng con đường này vũ trụ mới có thể tạo ra các nguyên tử cần thiết cho khỉ, heo và người. Việc Fred Hoyle đưa ra tiên đoán này là một trường hợp hiếm hoi trong vật lý vì chỉ dựa vào một bằng chứng thực nghiệm đơn giản là sự hiện hữu của con người. Câu chuyện này kéo theo một lượng khổng lồ các suy đoán siêu hình, mà phần lớn không đáng để cho chúng ta đề cập tới.

Quyển III, trang 336

Việc nghiên cứu các quá trình đốt cháy trong ngôi sao cũng giải thích cho việc Mặt trời và các sao không suy sụp. Đúng ra Mặt trời và ngôi sao là các quả cầu khí nóng và *áp suất khí* bắt nguồn từ nhiệt độ cao này giúp cho chúng không co nhỏ lại. Đối với các loại sao khác – đặc biệt có khối lượng lớn như sao kềnh đỏ – *áp suất bức xạ* của photon phát ra chống lại sự suy sụp; còn các loại sao khác, như sao neutron, thì đây là công việc của *áp suất Pauli*.

Tốc độ phản ứng hạt nhân trong ngôi sao rất nhạy đối với nhiệt độ T. Tốc độ phản ứng trong chu trình carbon tỷ lệ với T^{13} đối với sao loại O nặng nóng và T^{20} đối với sao như Mặt trời. Trong sao kềnh đỏ và siêu kềnh, tốc độ phản ứng 3-α tỷ lệ với T^{40}; sự phụ thuộc mạnh này dẫn tới việc sao thường chiếu sáng trong thời gian rất dài, thường là hàng ngàn hay triệu năm, vì sự thay đổi nhiệt độ sẽ được điều chỉnh bằng một cơ chế hồi dưỡng rất hiệu quả. Dĩ nhiên là có ngoại lệ: các sao biến quang sáng lên và tối đi theo chu kỳ vài ngày; một số sao thay đổi độ sáng theo chu kỳ vài năm. Ngay cả Mặt trời cũng có hiện tượng như vậy. Trong thập niên 1960, người ta khám phá ra là Mặt trời mạch động với tần số 5 phút. Biên độ thì nhỏ, chỉ 3 km trên 1.4 triệu km; tuy vậy, người ta vẫn đo được nó. Sau đó, các nhà nhật địa chấn đã khám phá thêm nhiều dao động của Mặt trời và trong năm 1993, cả trên các ngôi sao khác. Các dao động như vậy cho phép ta nghiên cứu những việc xảy ra trong ngôi sao, ngay cả trong từng lớp cấu tạo của sao.

Cũng cần nói thêm người ta vẫn chưa rõ bức xạ của Mặt trời thay đổi như thế nào trong một khoảng thời gian dài. Mặt trời có một *Chu kỳ Mặt trời* nổi tiếng là 11 năm nhưng khuynh hướng lâu dài thì ta vẫn chưa biết. Người ta chỉ thực hiện các phép đo chính xác từ năm 1978 trở đi, tức là mới chỉ có 3 chu kỳ. Độ thay đổi cường độ sáng của Mặt trời, thường gọi là *hằng số Mặt trời* có thể có những hệ quả quan trọng đối với việc nghiên cứu khí hậu; tuy vậy vấn đề này vẫn chưa được giải quyết.



HÌNH 125 Hình vẽ đơn giản của Joint European Torus khi vận hành tại Culham, cho ta thấy một phòng hình xuyến lớn và các nam châm để lưu giữ plasma (© EFDA-JET).

Tại sao lò phản ứng dung hợp chưa được phổ biến?

Trên thế giới, trong vòng hơn 50 năm nay, nhiều nhà vật lý và kỹ sư đã cố gắng xây dựng các lò phản ứng dung hợp. Các lò này cố gắng sao chép theo cơ chế giải phóng năng lượng trong Mặt trời. Cỗ máy đầu tiên đã thực hiện được việc tạo ra năng lượng vĩ mô thông qua phản ứng dung hợp năm 1991 là Joint European Torus* (viết tắt là JET) đặt ở Culham, Anh. Mặc dù đã thành công nhưng năng lượng sinh ra ít nhiều gì vẫn còn nhỏ hơn năng lượng cần để đốt nóng.

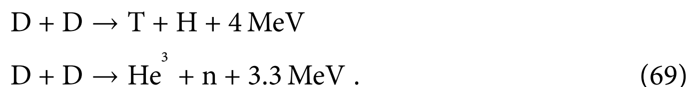
Xem 176

Ý tưởng của JET là tạo ra plasma cực nóng và hết sức đậm đặc. Khi nhiệt độ và mật độ đủ lớn thì phản ứng dung hợp xảy ra; năng lượng được giải phóng khi một dòng hạt được biến đổi (như trong lò phân hạch) thành nhiệt năng rồi thành điện năng. Để đánh lửa, JET sử dụng sự dung hợp giữa deuterium và tritium, vì phản ứng này có thiết diện ngang lớn và năng lượng thu được là:



$$\mathrm{D} + \mathrm{T} \rightarrow \mathrm{He}^4 + \mathrm{n} + 17.6\,\mathrm{MeV}\ . \qquad (68)$$

Vì tritium là chất phóng xạ nên nhiều thí nghiệm nghiên cứu được thực hiện với phản ứng deuterium–deuterium ít hiệu quả hơn, có thiết diện ngang nhỏ hơn và năng lượng thu được ít hơn:



$$\begin{aligned} \mathrm{D} + \mathrm{D} &\rightarrow \mathrm{T} + \mathrm{H} + 4\,\mathrm{MeV} \\ \mathrm{D} + \mathrm{D} &\rightarrow \mathrm{He}^3 + \mathrm{n} + 3.3\,\mathrm{MeV}\ . \end{aligned} \qquad (69)$$

* Tham khảo www.jet.edfa.org.

Sự dung hợp xảy ra khi deuterium và tritium (hay deuterium) đụng nhau với năng lượng lớn. Ta cần năng lượng lớn để vượt qua lực đẩy tĩnh điện trong hạt nhân. Nói cách khác, vật liệu phải nóng. Để giải phóng năng lượng từ deuterium và tritium, người ta cần năng lượng để đun nóng chúng. Điều này giống như việc đốt gỗ: để dùng gỗ làm nhiên liệu, trước tiên ta cần làm nóng chúng bằng một que diêm.

Xem 177 Theo *tiêu chuẩn Lawson*, được kỹ sư Anh John Lawson khám phá lại vào năm 1957, sau các nhà nghiên cứu Nga, một phản ứng dung hợp chỉ toả ra năng lượng khi tích số của mật độ n, thời gian phản ứng (hay lưu giữ) τ và nhiệt độ T lớn hơn một giá trị nào đó. Ngày nay tiêu chuẩn này được viết như sau

$$n\tau T > 3 \cdot 10^{28}\,\mathrm{s\,K/m^3}\ . \tag{70}$$

Để đạt được tiêu chuẩn Lawson, JET sử dụng nhiệt độ từ 100 tới 200 MK, mật độ hạt từ 2 tới $3 \cdot 10^{20}\,\mathrm{m^{-3}}$ và thời gian lưu giữ là 1 s. Nhiệt độ trong JET lớn hơn 15 MK ở tâm Mặt trời nhiều vì mật độ và thời gian lưu giữ nhỏ hơn rất nhiều.

Vật chất ở nhiệt độ này có dạng *plasma*: hạt nhân và electron hoàn toàn tách biệt nhau. Điều hiển nhiên là người ta không thể trút plasma 100 MK vào trong bồn chứa: các bức vách sẽ bốc hơi ngay. Lựa chọn duy nhất là giữ cho plasma lơ lửng trong chân không và tránh cho plasma chạm vào tường của bồn chứa. Thách thức chính của sự dung hợp trong quá khứ là tìm ra cách giữ hỗn hợp của hơi deuterium và tritium nóng treo lơ lửng trong một buồng chứa sao cho hơi đó không chạm vào thành buồng. Cách tốt nhất để treo hỗn hợp này là dùng từ trường. Điều này áp dụng được trong plasma dung hợp, vì điện tích được tách ra nên chúng tương tác với từ trường. Kết cấu hình học thành công nhất do các vật lý gia nổi tiếng người Nga Igor Tamm và Andrei Sakharov phát minh: *tokamak*. Trong các tokamak trên thế giới, JET lớn nhất và thành công nhất. Cỗ máy trong thực tế được vẽ trong Hình 125. JET được vận hành để giữ plasma không chạm vách trong khoảng 1s; rồi tình trạng trở nên không ổn định: plasma chạm tường và bị hấp thu. Sau *sự gián đoạn* đó, chu kỳ bơm khí, nung plasma và dung hợp phải khởi động lại. Như đã đề cập, JET đã khai hoả thành công, tức là năng lượng toả ra nhiều hơn năng lượng đốt nóng plasma. Tuy vậy, cho đến nay, người ta chưa thiết kế được một hệ thống sản xuất điện năng thương mại bền vững vì JET không kết nối với một máy phát điện nào.

Dự án tiếp theo, *ITER*, một tokamak quốc tế được xây dựng từ ngân sách của châu Âu, Nhật, Mỹ và Nga, với mục tiêu mở đường cho việc sản xuất năng lượng thương mại. Kích thước lò phản ứng sẽ gấp đôi JET; điều quan trọng hơn, ITER được hoạch định để đạt được thời gian lưu giữ 30 s. ITER sẽ sử dụng nam châm siêu dẫn nên phải có vật chất cực lạnh ở 4 K đặt cạnh vật chất cực nóng ở 100 MK. Nói cách khác, ITER sẽ là một sản phẩm kỹ thuật thượng đỉnh. Cơ sở vật chất đang được xây dựng tại Cadarache thuộc Pháp. Do không mang ý nghĩa kinh tế, ITER có cơ hội là một phiên bản hiện đại của tháp Babylon; nhưng một ngày nào đó nó sẽ bắt đầu hoạt động.

Giống như nhiều dự án khác, sự dung hợp bắt đầu bằng một giấc mơ: các khoa học gia đều loan truyền ý tưởng năng lượng dung hợp sẽ an toàn, sạch và dồi dào. Ba ý tưởng này vẫn còn hiện diện trong nhiều website về dung hợp hạt nhân trên khắp thế giới. Đặc biệt, người ta đã cho rằng lò dung hợp sẽ không nguy hiểm, ít tạo ra chất thải phóng xạ hơn lò phân hạch và dùng nước làm nhiên liệu cơ bản. 'Năng lượng dung hợp của Mặt trời sẽ sạch, an toàn và vô hạn giống như Mặt trời.' Trong thực tế, lý do duy nhất mà ta

không cảm thấy sự phóng xạ của Mặt trời là vì nó ở quá xa. Lò dung hợp hạt nhân, giống như Mặt trời, có tính phóng xạ mạnh. Việc quản lý lò dung hợp phóng xạ phức tạp hơn lò phân hạch rất nhiều.

Đúng là nhiên liệu của lò dung hợp hầu như vô hạn: deuterium được trích xuất từ nước và tritium – nguyên tố phóng xạ có thời gian sống ngắn, không có nhiều trong thiên nhiên – được sản xuất từ *lithium*. Lithium phải được làm giàu nhưng vì chất này không phóng xạ nên cũng không gây ra vấn đề gì. Tuy vậy, việc sản xuất tritium từ lithium là một quá trình không sạch sinh ra một lượng lớn chất phóng xạ. Năng lượng dung hợp không cạn nhưng không an toàn và sạch sẽ. Tóm lại, trong tất cả các dự án kỹ thuật do loài người khởi động từ trước tới bây giờ, thì dung hợp hạt nhân là một dự án đầy thách thức và tham vọng. Việc dung hợp có thể – hay sẽ thành công – là một chủ đề khác.

Nguyên tử của chúng ta từ đâu tới?

> Các nguyên tố được tạo ra trong thời gian ngắn hơn thời gian bạn nấu món khoai nướng vịt quay.
>
> George Gamow

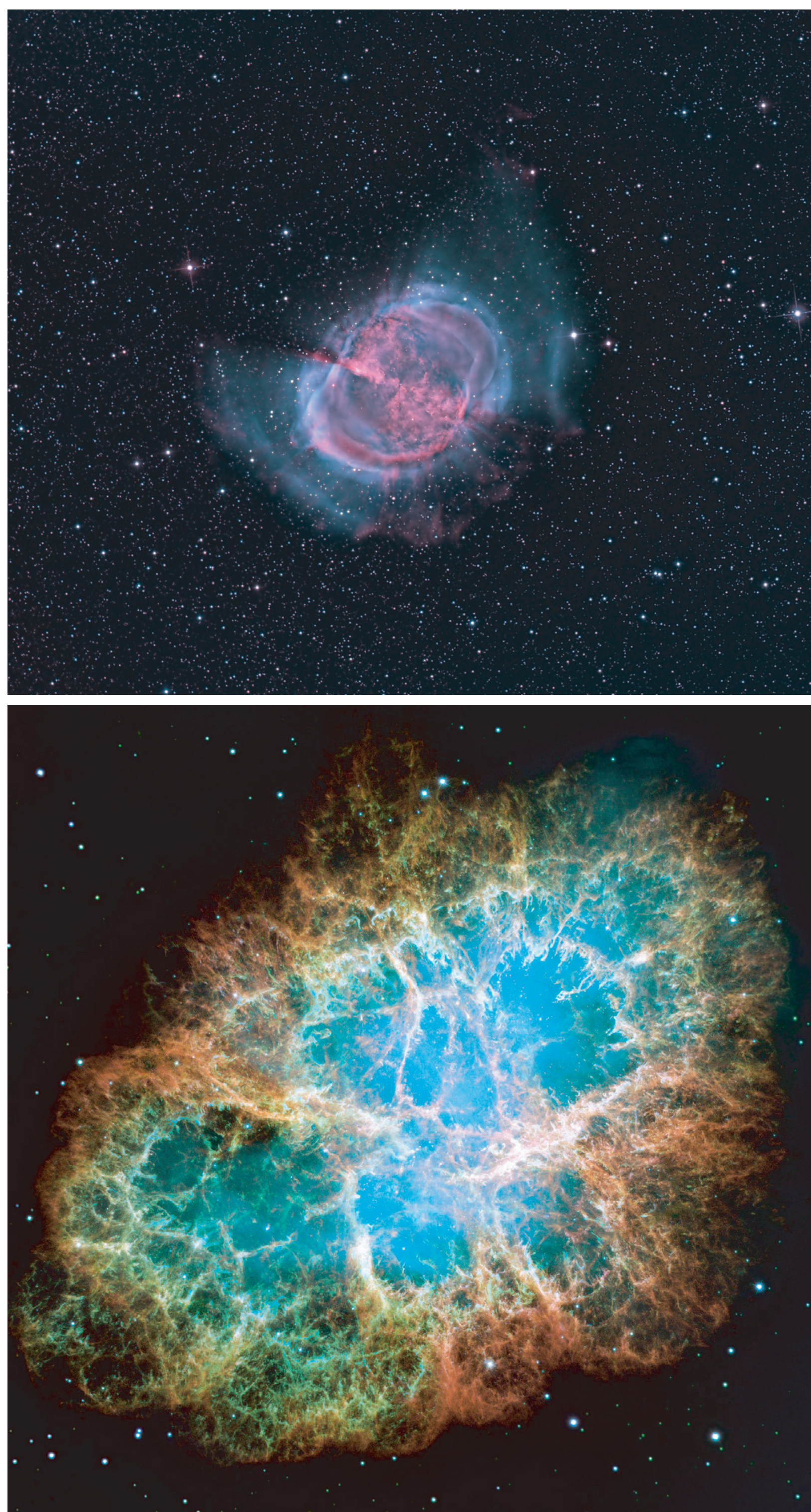
Con người bao gồm nhiều electron và hạt nhân khác nhau. Sự tổng hợp hạt nhân xảy ra
Xem 178
ở đâu? Nhiều nhà nghiên cứu đã tham gia trả lời câu hỏi này.

Sau big bang khoảng 3 phút, khi nhiệt độ khoảng 0.1 MeV, proton và neutron được tạo thành. Số proton bằng 7 lần số neutron, chủ yếu do sự khác biệt về khối lượng. Vì mật độ cao, neutron bị bắt giữ, qua trung gian hạt nhân deuterium, trong hạt α. Sau big bang khoảng 20 phút quá trình này ngừng lại, vì nhiệt độ thấp đến nỗi sự dung hợp không thể xảy ra. Sau phút 17, khối lượng vũ trụ được phân thành 75 % hydrogen, 25 % helium (tỷ lệ này do tỷ số 7 của số proton/neutron) và một ít deuterium, lithium, beryllium. Quá trình này được gọi là *sự tổng hợp hạt nhân nguyên thuỷ*. Các nguyên tố nặng hơn chưa được tạo ra vì nhiệt độ hạ xuống nên chúng không thể tích tụ lại với số lượng lớn và vì các hạt nhân có 5 hay 8 nucleon là hạt nhân bền.

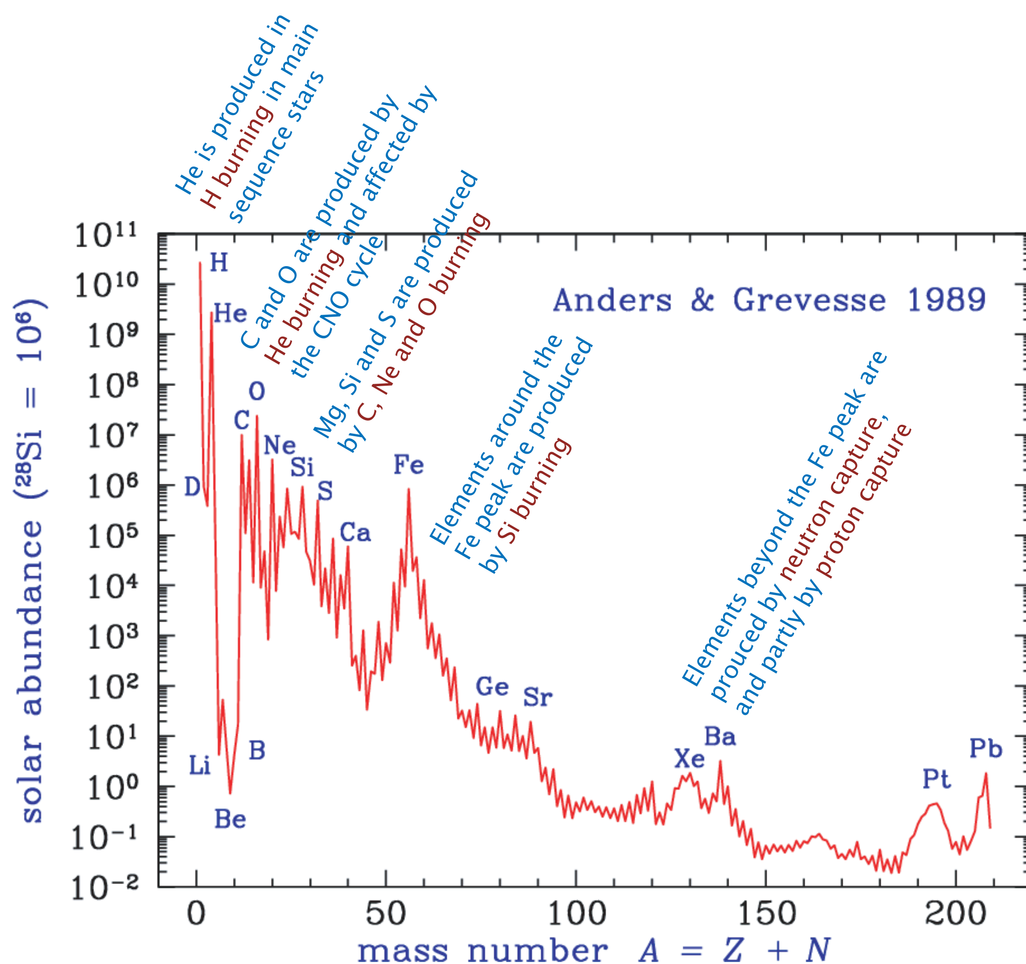
Các mô phỏng của sự tổng hợp hạt nhân nguyên thuỷ đều phù hợp với độ phổ cập của các nguyên tố được tìm thấy ở những nơi rất xa hay ở các ngôi sao rất già. Độ phổ cập này được suy ra từ phổ của các ngôi sao. Tóm lại, *các hạt nhân hydrogen, helium, lithium và beryllium được hình thànhngay sau ('trong lúc') big bang xảy ra*. Chúng được
Quyển II, trang 250
gọi là *các nguyên tố nguyên thuỷ*.

Tất cả các nguyên tố khác đều được tạo ra sau big bang nhiều triệu năm. Đặc biệt, *các*
Xem 179
hạt nhân nhẹ khác được tạo ra trong các ngôi sao. Các sao trẻ đốt hydrogen hay helium; các sao nặng hơn và già hơn đốt neon hay silicon. Những quá trình này cần nhiệt độ và áp suất cao chỉ có trong các sao có khối lượng ít nhất là 8 lần Mặt trời. Mọi quá trình dung hợp này đều bị giới hạn bởi hiện tượng quang phân ly và vì vậy chỉ có các hạt nhân tới ^{56}Fe.

Các hạt nhân nặng hơn sắt chỉ có thể được tạo ra từ sự bắt neutron. Có 2 quá trình bắt neutron chính. Quá trình 1 được gọi là *quá trình s* – vì chậm (slow). Quá trình này xảy ra trong ngôi sao và dần dần tạo ra các nguyên tố nặng – bao gồm hạt nhân bền nặng nhất là chì – từ các neutron bay quanh đó. Quá trình 2 là *quá trình r* – nhanh (rapid). Trong nhiều thập niên, người ta không biết nó xảy ra ở đâu và cho rằng nó xảy ra trong các vụ
Xem 181
nổ của sao. Nghiên cứu gần đây đã hướng tới ý tưởng *các vụ hợp nhất sao neutron* là nơi



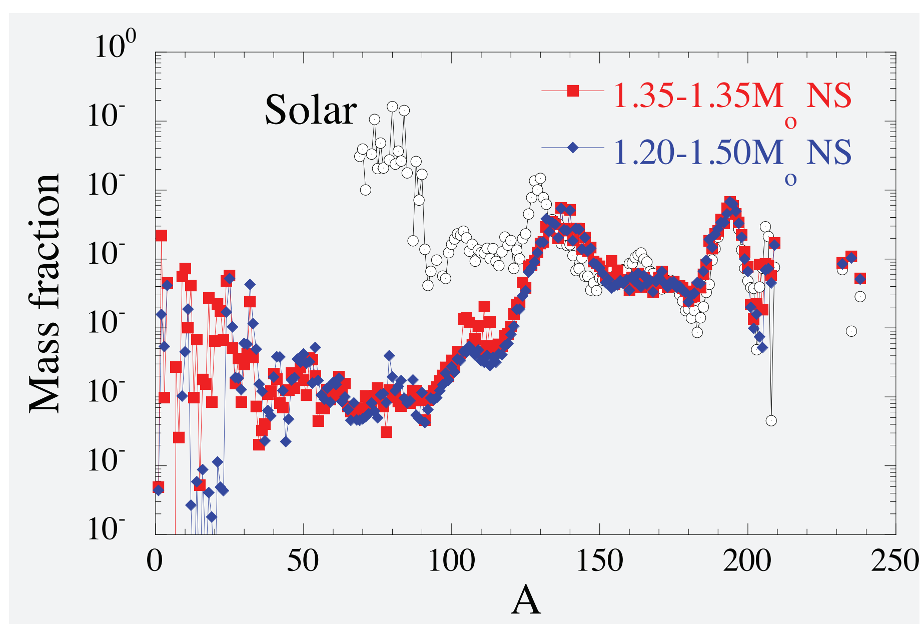
HÌNH 126 Hai thí dụ về các sao bùng nổ bắn vật chất vào không gian: tinh vân Con cua M1 và tinh vân Dumbbell M27 (courtesy NASA and ESA, © Bill Snyder).



HÌNH 127 Độ phổ cập của nuclide trong Thái dương hệ và các quá trình tạo ra chúng (Xem 180).

xảy ra quá trình r. Sự va chạm sẽ làm vật chất bắn vào không gian. Các dòng neutron lớn sẽ sinh ra các nguyên tố nặng. Có lẽ phần lớn các hạt nhân *vàng* được tổng hợp theo cách này. Người ta đã quan sát được sự hợp nhất sao neutron đầu tiên vào năm 2013 bằng kính thiên văn không gian Hubble, sau khi nó đã được phát hiện như là một vụ bùng nổ tia gamma GRB 130603B. Một sự kiện như vậy còn được gọi là một *thiên tân tinh*, vì năng lượng toả ra nằm trong khoảng năng lượng của *tân tinh* và *siêu tân tinh*. Vào tháng 10/2017, một hợp nhất sao neutron xa hơn, nhiều người biết hơn, được quan sát nhờ các máy phát hiện sóng hấp dẫn, máy phát hiện sự bùng nổ tia gamma và trên 70 kính thiên văn quang học. Nó xảy ra cách chúng ta 130 triệu năm ánh sáng. Độ phổ cập của các nguyên tố nặng trong Thái dương hệ có thể đo được một cách chính xác, như ta thấy trong Hình 127. Số liệu này phù hợp với số liệu tính toán từ sự tổng hợp vật chất trong các vụ hợp nhất sao neutron, ứng viên thích hợp nhất cho quá trình r hiện nay, như ta đã minh hoạ trong Hình 128.

Nhiều quá trình khác như *bắt proton*, *quá trình cân bằng*, cũng góp phần tạo ra các



HÌNH 128 Biểu đồ so sánh giữa độ phổ cập nuclide đo được (chấm tròn) trong Thái dương hệ và giá trị tính toán (hình vuông đỏ, hình thoi xanh) được tiên đoán từ sự hợp nhất của các sao neutron (Xem 181).

nguyên tố.

Tóm lại, electron và proton trong cơ thể chúng ta được tạo ra trong big bang; các hạt nhân nhẹ như carbon hay oxygen thì trong các ngôi sao; các hạt nhân nặng thì trong các vụ nổ của ngôi sao và trong sự hợp nhất sao neutron. Nhưng các hạt nhân này đến Trái đất bằng cách nào?

Ở một giai đoạn nào đó của ngôi sao, chúng bùng nổ. Sao bùng nổ được gọi là *siêu tân tinh*. Siêu tân tinh có vai trò quan trọng: phân bố phần lớn vật chất của sao, như carbon, nitrogen hay oxygen, vào không gian. Phần vật chất này thường ở dưới dạng các nguyên tử trung hoà. (Nhiều nguyên tố cũng được tổng hợp trong các vụ nổ.) Như vậy siêu tân tinh đóng vai trò chính trong việc phân bố vật chất vào không gian.

Mặt trời là ngôi sao thế hệ thứ 2 – được gọi là sao của 'quần thể I'. Thái dương hệ được hình thành từ tàn dư của một siêu tân tinh và đời sống trên Trái đất sau đó cũng vậy. Chúng ta được tạo thành từ các nguyên tử tái sinh.

Chúng ta là bụi sao tái sinh. Đây là một kết luận ngắn gọn rút ra từ sự nghiên cứu mở rộng của các nhà vật lý thiên văn về tất cả các loại sao được tìm thấy trong vũ trụ, bao gồm sự ra đời, phát triển, hợp nhất và bùng nổ. Việc tìm hiểu cách tiến hoá của sao và sự chuyển động của chúng trong thiên hà là một lĩnh vực nghiên cứu hấp dẫn và nhiều phương diện vẫn chưa được khám phá.

Quyển II, trang 215

Những điều kỳ lạ về Mặt trời và các ngôi sao

Điều gì sẽ xảy ra nếu Mặt trời bỗng nhiên ngừng chiếu sáng? Điều hiển nhiên là nhiệt độ sẽ giảm xuống hàng chục độ trong vài giờ. Trời sẽ mưa và nước sẽ đóng băng. Sau

4, 5 ngày, đời sống động vật sẽ ngừng lại. Sau vài tuần, đại dương sẽ đóng băng; sau vài tháng, không khí sẽ hoá lỏng. May mắn thay điều này không bao giờ xảy ra.

* *

Không phải người ta đã biết rõ về Mặt trời. Các dòng neutrino từ Mặt trời dao động với chu kỳ 28.4 ngày bằng với chu kỳ dao động của từ trường Mặt trời. Người ta vẫn tiếp tục tìm hiểu điều này.

* *

Mặt trời là một lò phản ứng dung hợp. Nhưng ảnh hưởng của nó rất quan trọng. Nếu Mặt trời sáng ít hơn hiện nay thì sự tiến hoá đã khác đi. Chúng ta sẽ không có mí mắt, vẫn có tóc nhưng sẽ có làn da sáng hơn. Bạn có thể tìm ra thêm một số thí dụ không? Câu đố 128 e

* *

Một số ngôi sao chiếu sáng giống như còi hụ của xe cảnh sát: cường độ sáng của chúng tăng giảm đều đặn. Các ngôi sao đó có tên là *Cepheid* có vai trò quan trọng vì chu kỳ của chúng phụ thuộc vào cường độ sáng (tuyệt đối) trung bình của chúng. Do đó, nếu đo được chu kỳ và độ sáng của chúng thì ta sẽ xác định được khoảng cách của chúng tới Trái đất.

* *

Vụ nổ bom hydrogen nhân tạo đầu tiên xảy ra ở đảo san hô Bikini. May mắn thay, nó chưa được thử trên người.

Nhưng thiên nhiên đã tạo ra các quả bom tốt hơn rất nhiều. Các vụ nổ hạt nhân mạnh nhất đã xảy ra trên mặt các sao neutron trong các sao đôi tia X. Vật chất từ các sao đồng hành rơi vào sao neutron, phần nhiều là hydrogen, sẽ được đốt nóng đến nhiệt độ dung hợp. Các vụ nổ này có thể quan sát được bằng kính thiên văn vì các ánh chớp của tia X kéo dài khoảng 10 s; sức mạnh của vụ nổ lớn hơn sức mạnh của bom hydrogen nhân tạo hàng triệu lần.

* *

Trong thập niên 1960s, người ta đã khám phá ra sự dao động của bề mặt Mặt trời. Trên bề mặt có sóng dừng biên độ vài trăm km, còn bước sóng lớn hơn hàng trăm lần; tần số là tần số của sóng kiểu p hay sóng âm bị bẫy, nằm trong khoảng từ 2 tới 4 mHz, gần bằng từ 8 tới 3 phút. Sự dao động này được thấy qua sự dao động của đường kính Mặt trời. Lĩnh vực nghiên cứu này được gọi là *Nhật chấn học*.

* *

Lithium, beryllium và bor là nguyên tố ít gặp trong các ngôi sao vì chúng hay bắt proton và biến thành nguyên tố khác. Cũng vì lý do đó ta ít gặp chúng trên Trái đất.

* *

Điều tình cờ là tỷ lệ thành phần của carbon, nitrogen và oxygen trong Mặt trời cũng giống như trong cơ thể người.

* *

Tương tác mạnh đóng vai trò chính trong việc điều chỉnh sự tổng hợp hạt nhân. Tuy vậy, nếu tương tác điện từ mạnh hơn hay yếu hơn thì các ngôi sao sẽ tạo ra ít oxygen hoặc carbon hơn, và chúng ta sẽ không có mặt trên đời này. Lập luận nổi tiếng này là của Fred Hoyle. Bạn có thể giải thích rõ hơn không?

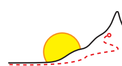
Câu đố 129 d

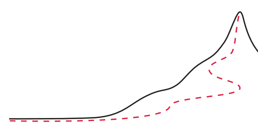
Tóm tắt về ngôi sao và tổng hợp hạt nhân

> Nhân loại đều là anh em. Chúng ta đến đây từ một siêu tân tinh chung.
>
> Allan Sandage

Sao và Mặt trời phát sáng nhờ phản ứng dung hợp hạt nhân. Năng lượng toả ra từ phản ứng dung hợp bắt nguồn từ tương tác hạt nhân mạnh giữa các nucleon. Khi sao sử dụng hết nhiên liệu hạt nhân, chúng thường bùng nổ. Trong một vụ nổ của siêu tân tinh như vậy, chúng bắn các hạt nhân vào không gian dưới dạng bụi. Trong quá khứ xa xưa, bụi tập hợp lại nhờ lực hấp dẫn và tạo nên Mặt trời, Trái đất và sau đó là loài người.

Các quá trình phản ứng hạt nhân nền tảng của sự tổng hợp hạt nhân đã được nghiên cứu kỹ càng. Sự tổng hợp hạt nhân trong big bang tạo nên hydrogen và helium, sự tổng hợp hạt nhân trong ngôi sao tạo nên hạt nhân nhẹ, và sự tổng hợp hạt nhân trong sự hợp nhất sao neutron và các vụ nổ siêu tân tinh tạo nên các nguyên tố nặng.





Chương 7

Tương tác mạnh – bên trong hạt nhân và các nucleon

Cả hiện tượng phóng xạ lẫn các ảnh y học đều chứng tỏ rằng hạt nhân là các hệ phức hợp. Nhưng Thuyết lượng tử còn đi xa hơn: cả proton lẫn neutron đều có cấu tạo phức hợp. Có 2 lý do: một, nucleon có kích thước hữu hạn và hai, moment từ của chúng không khớp với giá trị được tiên đoán đối với các chất điểm.

Tiên đoán về các thành phần trong proton đã được chứng minh vào cuối thập niên 1960 khi Kendall, Friedman và Taylor bắn các electron năng lượng cao vào nguyên tử Xem 182 hydrogen. Họ nhận thấy rằng proton chứa *3* cấu tử có spin 1/2. Thí nghiệm này có thể 'nhìn thấy' các cấu tử nhờ sự tán xạ của các electron giống như khi ta nhìn thấy các vật thể nhờ sự tán xạ của các photon. Các cấu tử này tương ứng với nhiều và (phần lớn) các Xem 183 tính chất của hạt *quark* được George Zweig và Murray Gell-Mann tiên đoán năm 1964.**

Tại sao có 3 quark trong 1 proton? Và chúng tương tác như thế nào? Câu trả lời sẽ hết sức sâu sắc và thú vị.

Bóng mờ của tương tác mạnh

Các thí nghiệm tán xạ sâu không đàn hồi đã đề cập chứng tỏ rằng tương tác giữ các proton với nhau trong hạt nhân, đã được Yukawa Hideki,*** mô tả lần đầu tiên, chỉ là một bóng mờ của tương tác giữ các quark với nhau trong proton. Cả 2 tương tác có cùng

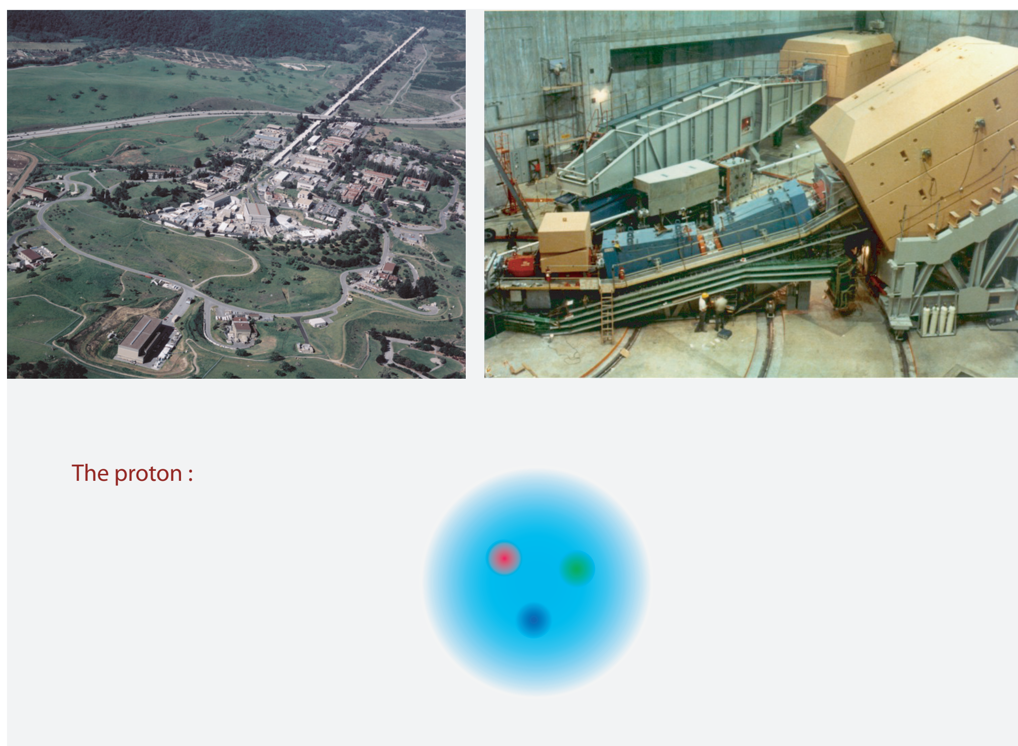
** Nhà vật lý George Zweig (b. 1937 Moscow) đưa ra ý tưởng quark – ông gọi chúng là *ách* – năm 1963, rõ ràng hơn Gell-Mann. Zweig nhấn mạnh tính hiện thực của ách, trong khi đó Gell-Mann, ngay từ đầu đã không tin vào sự hiện hữu của của quark. Zweig sau đó chuyển sang một lĩnh vực phức tạp hơn: sinh học thần kinh.

Murray Gell-Mann (b. 1929 New York) nhận giải Nobel vật lý năm 1969. Ông là người tạo ra thuật ngữ 'quark'. Thuật ngữ này có 2 nguồn gốc: chính thức, lấy từ *Finnegans Wake*, một tiểu thuyết của James Joyce; Xem 184 trong thực tế, Gell-Mann lấy nó trong tiếng Yiddish và tiếng Đức có nghĩa là 'phô mai mềm không béo' và nghĩa bóng của nó là 'ý tưởng ngớ ngẩn'.

Gell-Mann là nhân vật trung tâm của vật lý hạt trong thế kỷ 20; ông đưa ra khái niệm số lạ, nhóm tái chuẩn hoá, nhóm đối xứng vị SU(3) và Sắc động lực học lượng tử. Có một câu chuyện đồn đại là ông đã lấy ý tưởng, dữ liệu, kiến thức, khái niệm và ngay cả tên của lý thuyết V–A về tương tác yếu của môn đệ xuất sắc George Sudarshan rồi công bố nó, cùng với Richard Feynman, như công trình của riêng mình. Sự quy kết sai lầm này vẫn còn thấy trong nhiều sách giáo khoa.

Gell-Mann còn nổi tiếng trong cuộc chiến dai dẳng với Feynman về nhân vật xứng đáng nhận danh hiệu nhà vật lý kiêu căng nhất trong đại học của họ. Còn một giai thoại khác như sau: Newton đã từng viết trong một bức thư gởi cho Hooke: 'Nếu tôi nhìn thấy xa hơn anh và Descartes thì đó là nhờ tôi đứng trên vai của những người khổng lồ.' Gell-Mann nổi tiếng vì đã nói: 'Nếu tôi nhìn thấy xa hơn những người khác đó là vì chung quanh tôi toàn là những người lùn.'

*** Yukawa Hideki (b. 1907 Azabu, d. 1981 Kyoto), vật lý gia nổi tiếng, chuyên gia vật lý hạt và hạt nhân. Ông nhận giải Nobel vật lý năm 1949 nhờ lý thuyết về meson. Yukawa đã sáng lập ra tạp chí *Progress of*



HÌNH 129 Hình trên: SLAC, máy gia tốc tuyến tính electron và các máy phát hiện được sử dụng cho các thí nghiệm tán xạ electron sâu không đàn hồi. Hình dưới: một hình minh hoạ kết quả sau cùng cho thấy 3 tâm tán xạ trong proton.

tên. Hai trường hợp này ít nhiều cũng tương ứng với hai trường hợp trong Điện từ học mà ta tìm thấy trong vật chất nguyên tử. Thí dụ rõ ràng nhất là trường hợp các nguyên tử neon: tính chất cơ bản nhất và 'thuần tuý nhất' của tương tác điện từ là nguyên nhân gây ra lực hút giữa electron và hạt nhân neon; 'bóng' mờ của nó, tương tác Van-der-Waals, là nguyên nhân gây ra lực hút giữa các nguyên tử neon trong neon lỏng, các quá trình hoá hơi và ngưng tụ. Cả hai lực hút đều là lực điện từ nhưng cường độ khác nhau rất nhiều. Tương tự như vậy, tính chất cơ bản nhất và 'thuần tuý nhất' của tương tác mạnh dẫn tới việc tạo thành proton và neutron thông qua việc liên kết các quark với nhau; 'bóng' mờ của nó dẫn tới việc tạo thành các hạt nhân và phân rã α. Dĩ nhiên là người ta có thể thu thập phần lớn thông tin này từ việc nghiên cứu tính chất cơ bản nhất và 'thuần tuý nhất'.

Chuyển động liên kết, sở thú hạt và mô hình quark

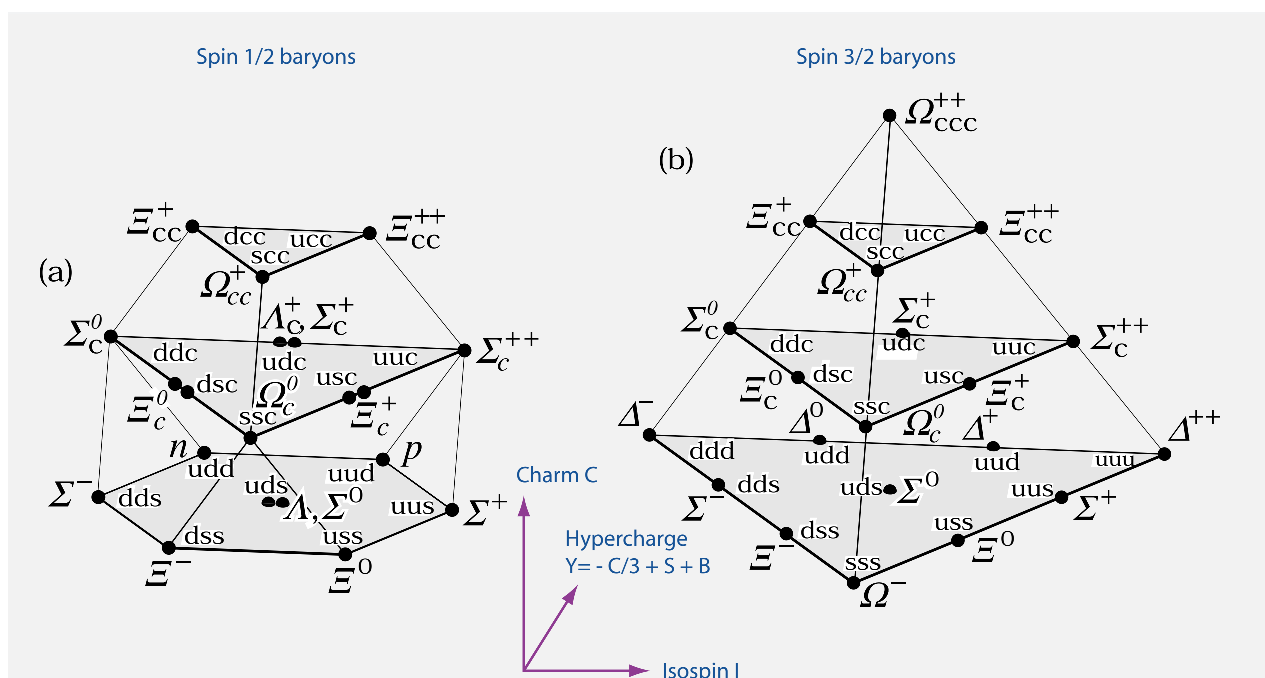
Sự tán xạ electron sâu chứng tỏ rằng proton được tạo ra từ các cấu tử tương tác với nhau. Người ta nghiên cứu các cấu tử này bằng cách nào?

Các nhà vật lý là những người giản dị. Để tìm hiểu cấu tạo của vật chất, đặc biệt là proton, họ không có ý tưởng nào tốt hơn là lấy tất cả các hạt mà họ kiếm được và cho

Theoretical Physics và cùng với bạn học Tomonaga Shin'ichiro, người cùng đoạt giải Nobel, là các khoa học gia điển hình của Nhật Bản.



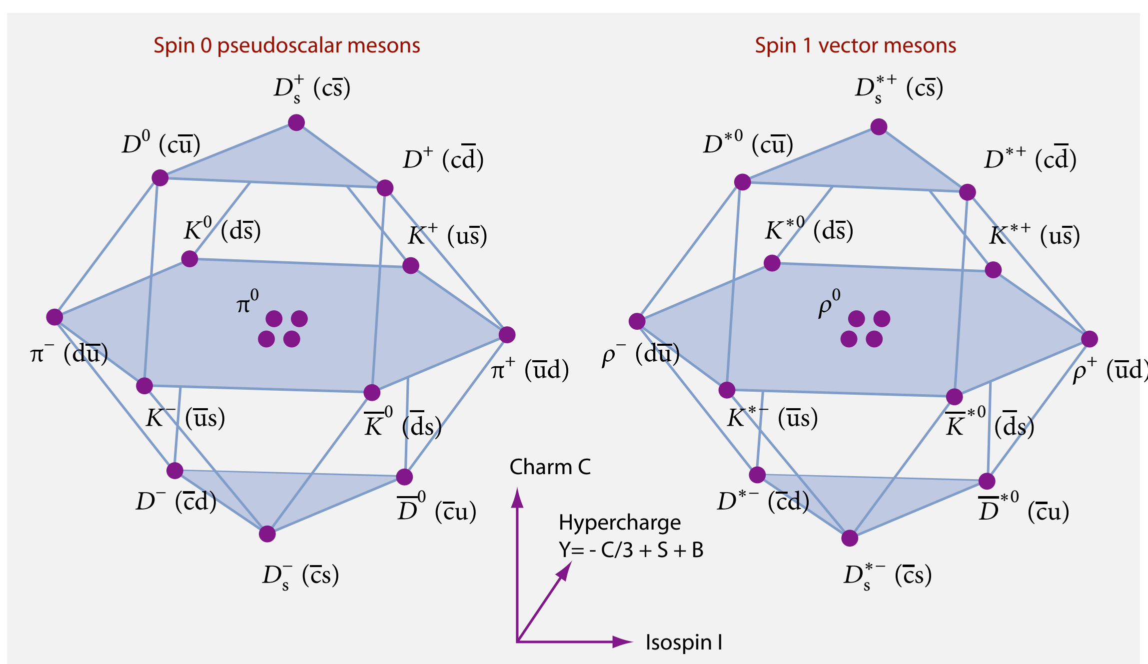
HÌNH 130 Một thí nghiệm điển hình được sử dụng để nghiên cứu mô hình quark: Proton Synchrotron ở CERN, Geneva (© CERN).



HÌNH 131 Giản đồ của họ baryon nhẹ nhất có cấu tạo là phức hợp qqq của 4 loại quark đầu tiên (Xem 186).

chúng va chạm với nhau. Nhiều nhà nghiên cứu đã làm công việc này trong nhiều thập niên. Rõ ràng đây là một lời dẫn giải khôi hài; đúng ra Thuyết lượng tử cấm hết các phương pháp khác. Bạn có thể giải thích được điều này không?

Xem 185
Câu đố 130 s



HÌNH 132 Giản đồ của họ meson giả vô hướng và meson vector nhẹ nhất có cấu tạo là phức hợp $q\bar{q}$ của 4 vị quark đầu tiên.

Việc tìm hiểu cấu trúc hạt bằng cách cho chúng va chạm với nhau không đơn giản. Hãy tưởng tượng là bạn muốn tìm hiểu cấu tạo của xe hơi bằng cách cho chúng đụng nhau. Trước khi kiếm được danh sách các thành phần cấu tạo thì bạn phải thực hiện và nghiên cứu rất nhiều vụ đụng xe. Đa số các kết quả giống nhau và nếu bạn đang tìm một phần đặc biệt thì phải chờ đợi rất lâu. Nếu phần này gắn chặt với các phần khác thì sự va chạm phải rất mạnh. Chưa kể chúng sẽ bị biến dạng. So với việc đụng xe, Thuyết lượng tử thêm vào các khả năng là mảnh vụn có thể biến đổi, phản ứng, liên kết và bị kích thích. Do đó ta cần phải cẩn thận và kiên nhẫn với các hạt nhiều hơn là các chiếc xe. Dù có khó khăn, trong nhiều thập kỷ qua, các nhà nghiên cứu đã thu thập được càng lúc càng nhiều các mảnh proton, còn gọi là *hadron*. Danh sách, một phần nhỏ của chúng được cho trongPhụ lục 14, thì dài quá mức; danh sách chính thức, đầy đủ dài hàng trăm trang chữ in nhỏ, có ở trang pdg.web.cern.ch chứa hàng trăm hadron. Hadron chia thành 2 loại chính: spin nguyên được gọi là *meson*, spin bán nguyên được gọi là *baryon*. Proton và neutron là baryon.

Trang 342

Rồi mô hình quark xuất hiện. Nhờ kỹ năng của nhiều nhà thực nghiệm và lý thuyết gia, mô hình này đã giải thích được toàn bộ bảng liệt kê meson và baryon là một hệ quả của sự liên kết 6 loại quark. Đặc biệt, một phần lớn của bảng có thể biểu diễn thành các giản đồ như trong Hình 132 và Hình 131. Các giản đồ này là mở đầu của phần cuối của Vật lý năng lượng cao. Mô hình quark đã giải thích được mọi lượng tử số của các mảnh vỡ và cho phép ta tìm hiểu tỷ khối và sự phân rã của chúng.

Mô hình quark giải thích lý do các mảnh vỡ phân thành 2 loại: tất cả *meson* đều gồm có 1 quark và 1 antiquark nên có spin nguyên; tất cả *baryon* đều có 3 quark nên có spin bán nguyên. Đặc biệt, proton và neutron là tổ hợp của 2 loại quark, *lên* (u) và *xuống* (d):

BẢNG 17 Quark.

Quark	Khối lượng m (xem tài liệu)	Spin J số chẵn lẻ P	Màu; nhược tính	Điện tích Q, spin đồng vị I, số lạ S, số duyên C, số đẹp B', số đỉnh T	số lepton L, số baryon B
Down d	4.5 tới 5.5 MeV/c^2	$\frac{1}{2}^+$	đỏ, lục, lam; bộ đơn, bộ đôi	$-\frac{1}{3}, -\frac{1}{2}, 0, 0, 0, 0$	$0, \frac{1}{3}$
Up u	1.8 tới 3.0 MeV/c^2	$\frac{1}{2}^+$	đỏ, lục, lam; bộ đơn, bộ đôi	$+\frac{2}{3}, +\frac{1}{2}, 0, 0, 0, 0$	$0, \frac{1}{3}$
Strange s	95(5) MeV/c^2	$\frac{1}{2}^+$	đỏ, lục, lam; bộ đơn, bộ đôi	$-\frac{1}{3}, 0, -1, 0, 0, 0$	$0, \frac{1}{3}$
Charm c	1.275(25) GeV/c^2	$\frac{1}{2}^+$	đỏ, lục, lam; bộ đơn, bộ đôi	$+\frac{2}{3}, 0, 0, +1, 0, 0$	$0, \frac{1}{3}$
Bottom b	4.18(3) GeV/c^2	$\frac{1}{2}^+$	đỏ, lục, lam; bộ đơn, bộ đôi	$-\frac{1}{3}, 0, 0, 0, -1, 0$	$0, \frac{1}{3}$
Top t	173.5(1.4) GeV/c^2	$\frac{1}{2}^+$	đỏ, lục, lam; bộ đơn, bộ đôi	$+\frac{2}{3}, 0, 0, 0, 0, +1$	$0, \frac{1}{3}$

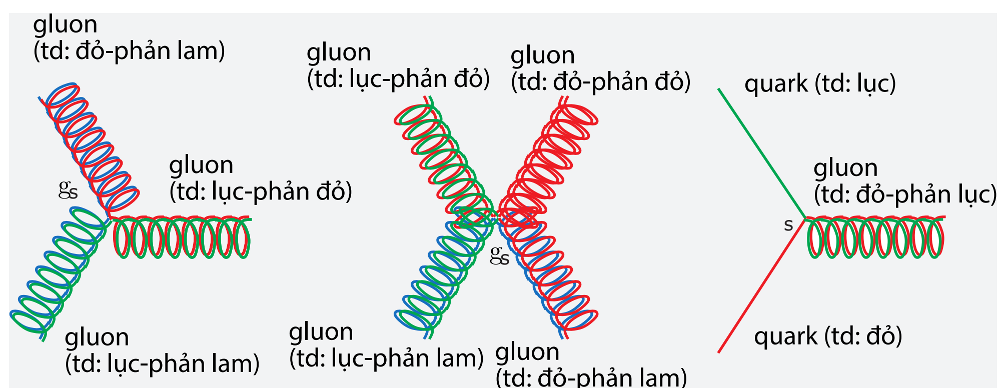
proton ở trạng thái *uud*, neutron ở trạng thái *udd*. Việc khám phá các hadron khác dẫn tới sự bổ sung thêm 4 loại quark. Tên của các quark có gì đó khó hiểu: chúng là *lạ* (s), *duyên* (c), *đáy* (b) – hay lúc trước gọi là 'đẹp' – và *đỉnh* (t) – trước kia gọi là 'thật'. Loại của quark được gọi là *vị*; tóm lại có 6 vị quark trong thiên nhiên.

Tất cả các quark đều có spin 1/2; chúng là fermion. Điện tích của chúng là bội số của 1/3 điện tích electron. Ngoài ra, quark còn có một tích mạnh, được gọi một cách khó hiểu là *sắc tích*. Khác với trong Điện từ học, chỉ có điện tích dương, âm và trung hoà, tương tác mạnh có các quark đỏ, lục, lam một bên và phản đỏ, phản lục, phản lam ở một bên. Trạng thái trung hoà được gọi là 'trắng'. Mọi baryon, bao gồm proton lẫn neutron và tất cả meson đều trắng, giống như các nguyên tử đều trung hoà.

Bản chất của Sắc động lực học lượng tử

Lý thuyết mô tả các trạng thái liên kết của quark được gọi là *Sắc động lực học lượng tử*, hay QCD. Nó đã được Fritzsch, Gell-Mann và Leutwyler trình bày dưới dạng hoàn chỉnh Xem 187 vào năm 1973. Giống như trong nguyên tử, electron và proton liên kết với nhau bằng cách trao đổi các photon ảo, trong proton, các quark liên kết với nhau bằng cách trao đổi các gluon ảo. *Gluon* là lượng tử của tương tác mạnh và tương ứng với photon, lượng tử của tương tác điện từ.

Xem 188 Sắc động lực học lượng tử mô tả mọi chuyển động bắt nguồn từ tương tác mạnh bằng 3 quá trình cơ bản trình bày trong Hình 133: 2 gluon có thể tán xạ, một gluon có thể phát



HÌNH 133 Bản chất của Lagrangian QCD: giản đồ Feynman của tương tác mạnh.

xạ hay hấp thu một hạt khác, quark có thể phát xạ hay hấp thu một gluon. Trong Điện động lực học, chỉ có thể xảy ra giản đồ sau cùng; trong tương tác mạnh, cũng có thể xảy ra hai dạng đầu. Hai giản đồ đầu dùng để giải thích sự giam giữ quark và đó cũng là lý do không có quark tự do trong thiên nhiên.

QCD là một lý thuyết *chuẩn*: các trường của tương tác mạnh có bất biến chuẩn trên nhóm Lie SU(3). Cũng cần nhắc lại là trong trường hợp của Điện động lực học, nhóm chuẩn là U(1) và là nhóm Abel hay giao hoán. Ngược lại, SU(3) là nhóm không Abel; QCD là lý thuyết chuẩn không Abel. Lý thuyết chuẩn không Abel do Wolfgang Pauli phát minh và phổ biến. Nó thường bị gọi sai là *lý thuyết Yang–Mills* sau khi họ trình bày lại ý tưởng của Pauli.

Bắt nguồn từ nhóm đối xứng chuẩn SU(3) nên ta có 8 gluon; chúng là đỏ-phản lục, lam-phản đỏ, v.v... Vì SU(3) không Abel nên các gluon tương tác như hai giản đồ đầu tiên trong Hình 133. Ngoài 3 tổ hợp đỏ-phản đỏ, lam-phản lam và lục-phản lục, chỉ có 2 gluon độc lập tuyến tính, nên tổng cộng có $3^2 - 1 = 8$ gluon.

Cường độ liên kết của tương tác mạnh, 3 quá trình cơ bản trong Hình 133, cùng với nhóm chuẩn SU(3) và 6 quark, đã xác định đầy đủ tính chất của tương tác mạnh. Đặc biệt, chúng cũng xác định đầy đủ mật độ Lagrange của nó.

Lagrangian của Sắc động lực học lượng tử

*

Mật độ Lagrange của tương tác mạnh có thể xem như một cách biểu diễn phức tạp của giản đồ Feynman trong Hình 133. Thật vậy, mật độ Lagrange của Sắc động lực học

* Phần này có thể bỏ qua trong lần đọc đầu tiên.

lượng tử là

$$\mathcal{L}_{QCD} = -\tfrac{1}{4}F^{(a)}_{\mu\nu}F^{(a)\mu\nu} - c^2\sum_q m_q\overline{\psi}^k_q\psi_{qk} + i\hbar c\sum_q \overline{\psi}^k_q\gamma^\mu(D_\mu)_{kl}\psi^l_q \qquad (71)$$

trong đó cường độ trường gluon và đạo hàm hiệp biến chuẩn là

$$F^{(a)}_{\mu\nu} = \partial_\mu A^a_\nu - \partial_\nu A^a_\mu + g_s f_{abc}A^b_\mu A^c_\nu$$

$$(D_\mu)_{kl} = \delta_{kl}\partial_\mu - i\frac{g_s}{2}\sum_a \lambda^a_{k,l}A^a_\mu\ .$$

Ta hãy nhớ lại phần nói về nguyên lý tác dụng cực tiểu mà Lagrangian luôn luôn là tổng của các tích vô hướng; điều này thể hiện rõ trong biểu thức (71). Chỉ số $a = 1\ldots 8$ đánh số 8 loại gluon và chỉ số $k = 1, 2, 3$ đánh số 3 loại sắc tích, tất cả đều từ SU(3) mà ra. Chỉ số $q = 1\ldots 6$ đánh số 6 vị quark. Trường $A^a_\mu(x)$ là 8 trường gluon, được biểu diễn bằng hình lò xo trong Hình 133. Trường $\psi^k_q(x)$ là các trường của quark có vị q và sắc tích k, được biểu diễn bằng đường thẳng trong hình. Sáu X 3 trường quark, giống như các trường của fermion sơ cấp, là các spinor Dirac 4 thành phần với khối lượng m_q.*

Quyển I, trang 279

Lagrangian (71) là một hàm của lý thuyết trường *địa phương*: các biến động lực là các hàm của vị trí. Nói cách khác, QCD tương tự như Điện động lực học lượng tử.

Số hạng đầu tiên của Lagrangian (71) biểu diễn động năng của bức xạ (gluon), số hạng thứ nhì hay số hạng khối lượng là động năng của các hạt vật chất (quark) và số hạng thứ 3 là sự tương tác giữa hai đối tượng trên.

Số hạng thứ 2 trong Lagrangian là số hạng duy nhất làm hỏng hay *phá vỡ tính đối xứng vị*, tức là tính đối xứng của sự trao đổi các loại quark. (Trong Vật lý hạt, đối xứng này còn được gọi là *thủ đối xứng*, vì những lý do có tính lịch sử.) Điều hiển nhiên là số hạng này cũng phá vỡ đối xứng bảo giác không-thời gian.

Số hạng tương tác trong Lagrangian tương ứng với giản đồ thứ 3 trong Hình 133. Cường độ tương tác mạnh được mô tả bằng *hằng số liên kết mạnh* g_s. Hằng số này độc lập với vị và sắc tích, như đã thể hiện trong các thí nghiệm. Số hạng tương tác này không hoà trộn các quark khác nhau; như đã thấy trong các thí nghiệm, vị được bảo toàn trong tương tác mạnh, giống như số baryon. Tương tác mạnh cũng bảo toàn tính chẵn lẻ không gian P và tính chẵn lẻ liên hiệp điện tích C. Tương tác mạnh không biến đổi vật chất.

Trong QCD, 8 gluon không có khối lượng; tính chất này cũng suy ra từ thực nghiệm. Do đó không có số hạng khối lượng gluon trong Lagrangian. Cũng dễ thấy là gluon có khối lượng sẽ làm hỏng tính bất biến chuẩn. Như đã nói ở trên, khác với Điện từ học, nơi nhóm chuẩn U(1) là nhóm Abel, nhóm chuẩn SU(3) của tương tác mạnh không phải là nhóm Abel. Kết quả là sắc trường có mang tích, tức là có màu, và chỉ số a xuất hiện trên trường A và F. Kết quả là gluon có thể tương tác với nhau, khác với photon, đi ngang qua nhau mà không gây ra ảnh hưởng gì. Hai giản đồ đầu tiên trong Hình 133 như vậy được phản ánh trong định nghĩa có phần phức tạp của trường $F^{(a)}_{\mu\nu}$. Khác với Điện động

Câu đố 131 ny

* Matrix γ_μ có thể viết dưới dạng đơn giản nhất là

$$\gamma_0 = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & -I \end{pmatrix} \quad \text{và} \quad \gamma_n = \begin{pmatrix} 0 & \sigma^i \\ -\sigma^i & 0 \end{pmatrix} \quad \text{với } n = 1, 2, 3 \qquad (72)$$

trong đó σ^i là các matrix spin Pauli.

Quyển IV, trang 232

lực học, định nghĩa này có thêm một số hạng *bậc 2* trong trường A; nó được mô tả bởi hằng số cấu trúc f_{abc} và cường độ tương tác g_s. Các số f_{abc} là các hằng số cấu trúc của
Trang 362 SU(3).

Tính chất của các phép biến đổi chuẩn và của trường gluon được mô tả bằng 8 matrix $\lambda^a_{k,l}$. Chúng là một biểu diễn 3 chiều, cơ bản của *hàm sinh* của đại số SU(3) và tương ứng với 8 loại gluon. Matrix $\lambda_a, a = 1...8$, và các hằng số cấu trúc f_{abc} tuân theo các hệ thức

$$[\lambda_a, \lambda_b] = 2if_{abc}\lambda_c$$
$$\{\lambda_a, \lambda_b\} = 4/3\delta_{ab}I + 2d_{abc}\lambda_c \qquad (73)$$

trong đó I là matrix đơn vị. Các hằng số cấu trúc f_{abc} của SU(3), là hàm lẻ dưới phép hoán vị các cặp chỉ số, và d_{abc}, là hàm chẵn, có giá trị

abc	f_{abc}	abc	d_{abc}	abc	d_{abc}
123	1	118	$1/\sqrt{3}$	355	$1/2$
147	$1/2$	146	$1/2$	366	$-1/2$
156	$-1/2$	157	$1/2$	377	$-1/2$
246	$1/2$	228	$1/\sqrt{3}$	448	$-1/(2\sqrt{3})$
257	$1/2$	247	$-1/2$	558	$-1/(2\sqrt{3})$
345	$1/2$	256	$1/2$	668	$-1/(2\sqrt{3})$
367	$-1/2$	338	$1/\sqrt{3}$	778	$-1/(2\sqrt{3})$
458	$\sqrt{3}/2$	344	$1/2$	888	$-1/\sqrt{3}$
678	$\sqrt{3}/2$				

(74)

Tất cả các phần tử khác đều triệt tiêu. Về phương diện vật lý, các hằng số cấu trúc của SU(3) mô tả chi tiết tương tác giữa quark và gluon cũng như giữa các gluon với nhau.

Một biểu diễn 3 chiều cơ bản của 8 hàm sinh λ_a – tương ứng với 8 loại gluon – được cho bởi tập hợp các *matrix Gell-Mann*

$$\lambda_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \lambda_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \lambda_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$
$$\lambda_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \lambda_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix} \lambda_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$
$$\lambda_7 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix} \lambda_8 = \frac{1}{\sqrt{3}}\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix} . \qquad (75)$$

Có 8 matrix, mỗi loại gluon một matrix, với 3×3 phần tử, bắt nguồn từ 3 màu của tương tác mạnh. Không có gluon thứ 9 vì gluon đó sẽ không có màu hay 'trắng'.

Lagrangian chỉ đầy đủ khi bao gồm 6 khối lượng của quark và hằng số liên kết g_s. Dĩ nhiên những giá trị này, giống như nhóm đối xứng SU(3), sẽ không thể giải thích bằng

QCD.

Chỉ có các quark và gluon xuất hiện trong Lagrangian của QCD, vì chỉ có quark và gluon tương tác bằng lực mạnh. Điều này cũng có thể phát biểu là chỉ có quark và gluon có màu; *sắc tích* là nguồn của lực mạnh giống như điện tích là nguồn của trường điện từ. Tương tự như điện tích, sắc tích *được bảo toàn* trong mọi tương tác. Điện tích có 2 loại, dương và âm; sắc tích có 3 loại, *đỏ*, *lục* và *lam*. Trạng thái trung hoà, không có sắc tích, được gọi là *trắng*. Proton và neutron, và cả electron, neutrino, đều 'trắng', là phần tử *trung hoà* của tương tác mạnh.

Tóm lại, 6 loại quark tương tác bằng cách trao đổi 8 loại gluon. Sự tương tác này được mô tả bằng giản đồ Feynman trong Hình 133, hay một cách tương đương bằng Lagrangian (71). Cả hai cách mô tả đều do yêu cầu nhóm chuẩn là SU(3) và khối lượng cùng hằng số liên kết đã có. Người ta cần một núi công việc để chứng minh là mọi thí nghiệm đều phù hợp với Lagrangian của QCD; mọi mô tả khác đều bị gạt bỏ.

Các hệ quả thực nghiệm của mô hình quark

Có phải ta đã làm ra vẻ là quark và gluon có thực, mặc dù chưa ai nhìn thấy chúng? Đã có nhiều cuộc bàn luận ủng hộ cho khuynh hướng này.

* *

Mô hình quark giải thích được sự có mặt của moment từ của neutron và moment từ μ của các baryon. Bằng cách mô tả proton là trạng thái *uud* và neutron là trạng thái *udd*, không có moment động lượng quỹ đạo và sử dụng các hàm sóng chính xác, ta kiếm được

$$\mu_u = \tfrac{1}{5}(4\mu_p + \mu_n) \qquad \text{và} \qquad \mu_d = \tfrac{1}{5}(4\mu_n + \mu_p)\ . \tag{76}$$

Giả sử $m_u = m_d$ và moment từ của quark tỷ lệ với điện tích, mô hình quark tiên đoán tỷ số của moment từ của proton và neutron là

$$\frac{\mu_p}{\mu_n} = -\frac{3}{2}\ . \tag{77}$$

Tiên đoán này chỉ khác với trị số đo được 3 %. Ngoài ra, nhờ sử dụng cùng một trị moment từ của quark, người ta đã tiên đoán được moment từ của trên nửa tá baryon khác. Những kết quả này chỉ sai biệt với trị đo được khoảng 10 %. Đặc biệt, người ta luôn xác định đúng dấu của moment từ của baryon.

* *

Mô hình quark mô tả mọi *lượng tử số* của meson và baryon. Người ta đã tìm lại được số chẵn lẻ P, số chẵn lẻ C và sự kiện không có số chẵn lẻ của một số meson. Người ta cũng tìm lại được các định luật bảo toàn điện tích, số baryon, spin đồng vị, số lạ v.v... Các giản đồ của họ Hadron như trong Hình 131 và trong Hình 132 mô tả *đầy đủ* mọi trạng thái của hadron (có moment động lượng nhỏ nhất); người ta không thấy các trạng thái không được liệt kê trong hình. Mô hình quark tạo ra một sự phân loại đủ và đúng của mọi hadron khi chúng được xem như các trạng thái liên kết của các quark.

* *

Mô hình quark cũng giải thích được *khối phổ* của các hadron. Người ta có được các tiên đoán chính xác nhất nhờ các tính toán bằng QCD trên các mạng tinh thể. Trải qua nhiều tháng trên máy tính, các nhà nghiên cứu có thể tìm lại khối lượng của proton và neutron
Xem 189 với sai số vài phần trăm. Điều thú vị là nếu người ta đặt khối lượng các quark u và $d = 0$,
Xem 190 thì khối lượng proton và neutron khác với trị thực nghiệm chỉ 10 %. Khối lượng proton và neutron gần như hoàn toàn bắt nguồn từ sự tương tác chứ không do các cấu tử. Ta sẽ
Trang 233 biết thêm chi tiết trong phần dưới đây.

* *

Ta phải tính đến số màu của quark để kiếm được sự tương đương giữa lý thuyết và tính toán. Thí dụ như thời gian phân rã đo được của pion trung hoà là 83 as. Nếu không dùng màu khi tính toán ta có kết quả 750 as; nếu mỗi quark được giả sử là có 3 màu thì giá trị phải được chia cho 9, phù hợp với thí nghiệm.

* *

Trong các máy gia tốc va chạm, sự va chạm electron và positron có lúc tạo ra hadron. Tốc độ phát sinh theo tính toán cũng phù hợp với thực nghiệm chỉ khi quark có 3 màu. Nói rõ hơn, nếu ta so sánh tỷ số sản phẩm muon–antimuon và sản phẩm hadron, một
Câu đố 132 s hệ thức ước tính đơn giản giữa chúng và điện tích của chúng là:

$$R = \frac{\sum q_{\text{hadrons}}}{\sum q_{\text{muons}}} \qquad (78)$$

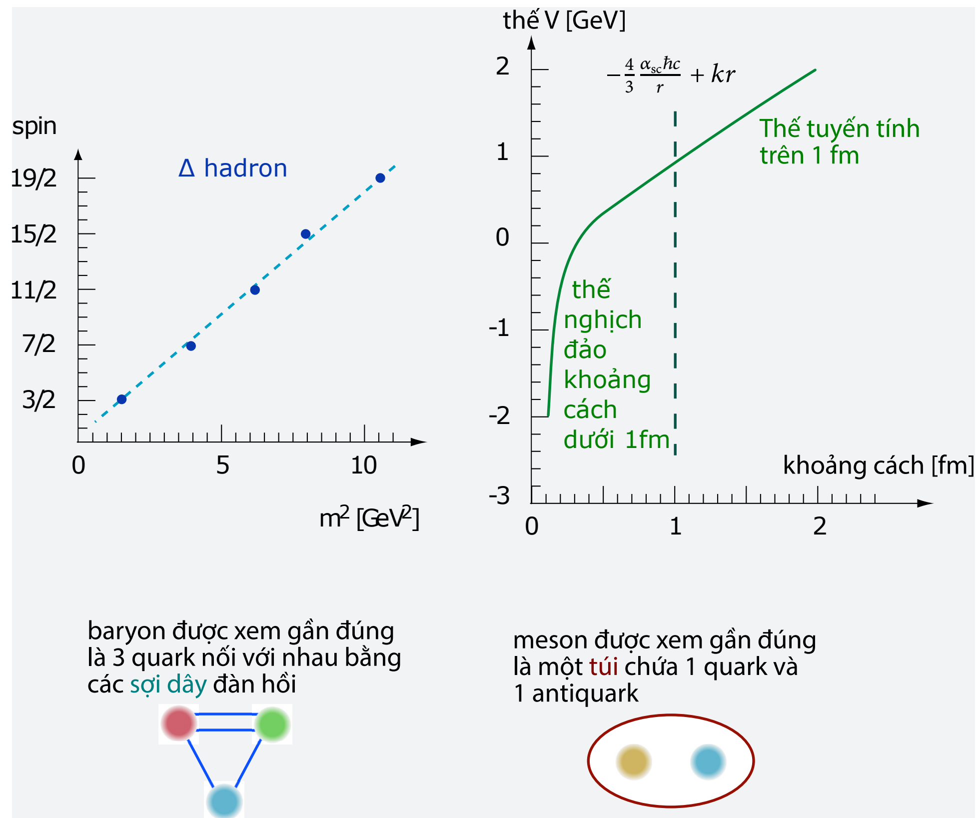
Trong khoảng từ 2 tới 4 GeV, khi có mặt của 3 quark, thì lập luận này tiên đoán $R = 2$ nếu có màu, hay $R = 2/3$ nếu chúng không có màu. Thực nghiệm đo được $R = 2.2$, như vậy khẳng định việc có màu. Nhiều đại lượng khác như *tỷ số phân nhánh* có thể tính được bằng cách này. Chúng phù hợp với thực nghiệm chỉ khi số màu là 3.

Sự giam giữ quark – và những con voi

Nhiều hadron không có trong giản đồ của Hình 131 và Hình 132; người ta có thể giải thích các hadron này là *các trạng thái kích thích quay* của các meson cơ bản trong các giản đồ đó. Như Tullio Regge đã chứng minh năm 1957, ý tưởng về các trạng thái kích thích quay sẽ cho ta các kết quả định lượng. Regge giả sử rằng meson và baryon là các quark kết nối với nhau bằng các sợi dây, giống như các dây cao su – được minh hoạ trong Hình 134 và Hình 135 – với lực căng dây k giữa các quark không đổi trên khoảng cách đó.

Giả sử dây có chiều dài $2r_0$, quay quanh khối tâm chung thật nhanh, như ta thấy trong Hình 135. Lúc đó ta sẽ có

$$v(r) = c\frac{r}{r_0} . \qquad (79)$$



HÌNH 134 Hình trên bên trái: quỹ đạo Regge hay đồ thị Chew–Frautschi, bắt nguồn từ sự giam giữ của quark. Hình trên bên phải: thế giam giữ quark. Hàng dưới: hai cách mô tả quark gần đúng: mô hình dây và mô hình túi của hadron.

Giả sử ta bỏ qua khối lượng của quark. Năng lượng toàn phần sẽ là

$$E = c^2 m = 2\int_0^{r_0} \frac{k}{\sqrt{1 - v(r)/c^2}} \mathrm{d}r = k r_0 \pi \qquad (80)$$

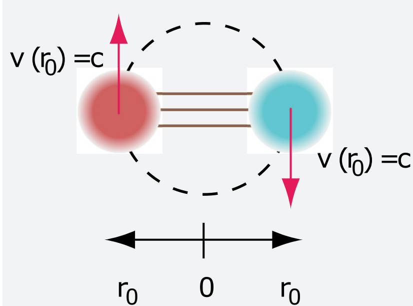
và moment động lượng là

$$J = \frac{2}{\hbar c^2}\int_0^{r_0} \frac{k r v(r)}{\sqrt{1 - v(r)/c^2}} \mathrm{d}r = \frac{k r_0^2}{2\hbar c} \, . \qquad (81)$$

Nếu tính cả spin của quark, ta sẽ có

$$J = \alpha_0 + \alpha' m^2 \quad \text{trong đó} \quad \alpha' = \frac{c^3}{2\pi k \hbar} \, . \qquad (82)$$

Như vậy Regge đã tìm ra một hệ thức đơn giản giữa khối lượng m của hadron bị kích



HÌNH 135 Tính khối lượng của hadron bị kích thích.

thích với spin J toàn phần của chúng. Vì những lý do lịch sử kỳ quặc, hệ thức này được gọi là *quỹ đạo Regge*.

Giá trị của hằng số α' được tiên đoán độc lập với sự ghép cặp quark–antiquark. Vài năm sau đó, như ta thấy trong Hình 134, mối liên hệ tuyến tính như vậy đã được tìm thấy trong thực nghiệm: *đồ thị Chew-Frautschi*. Thí dụ như 3 trạng thái thấp nhất của Δ có spin 3/2 Δ(1232) với m^2 là 1.5 GeV^2, có spin 7/2 Δ(1950) với m^2 là 3.8 GeV^2 và spin 11/2 Δ(2420) với m^2 là 5.9 GeV^2. Giá trị của hằng số α' được tìm thấy bằng thực nghiệm có trị số vào khoảng 0.93 GeV^{-2} đối với hầu hết các meson và baryon, trong khi trị của
Xem 188 α_0 thay đổi từ hạt này qua hạt khác. Như vậy lực căng dây của quark sẽ là

$$k = 0.87\,\text{GeV/fm} = 0.14\,\text{MN}\,. \quad (83)$$

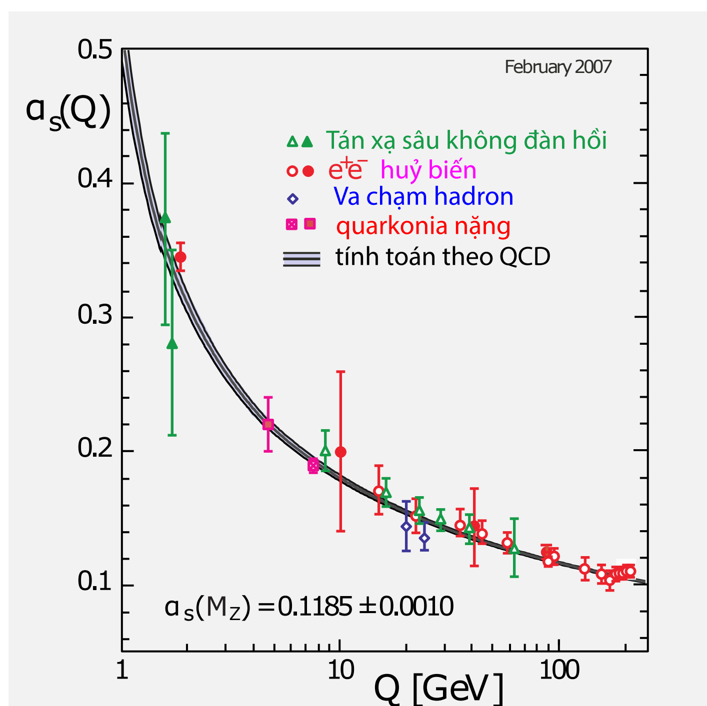
Nói cách khác, 2 quark trong 1 hadron hút nhau với 1 lực bằng trọng lượng của 2 con voi: khoảng 14 tấn.

Như vậy thí nghiệm đã rõ ràng: đồ thị Chew-Frautschi, cũng như nhiều thí nghiệm khác mà ta không để cập ở đây, được mô tả tốt nhất bằng thế quark–quark ở phần trên 1 fm, *tỷ lệ* với khoảng cách. Độ dốc của thế tuyến tính, lực, có giá trị bằng với lực quả đất hút 2 con voi. Kết quả là quark *không bao giờ* xuất hiện dưới dạng hạt tự do: quark luôn luôn *bị giam giữ* trong hadron. Tình trạng này khác với QED, là lực giữa các tích dần tới 0 khi khoảng cách lớn; như vậy điện tích không bị giam giữ và có thể hiện hữu dưới dạng các hạt tự do. Khi khoảng cách lớn, điện thế *giảm đi* theo 1/r. Trái lại, đối với
Xem 185 tương tác mạnh, theo thực nghiệm thế của quark tuân theo hệ thức

$$V = -\frac{4}{3}\frac{\alpha_{sc}\hbar c}{r} + kr \quad (84)$$

trong đó k là 0.87 GeV/fm, α_{sc} là 0.2, và $\hbar c$ là 0.1975 GeV/fm. Thế của quark được biểu diễn trong Hình 134.

Mặc dù thực nghiệm đã rõ ràng, các lý thuyết gia vẫn có vấn đề cần giải quyết. Cho đến nay, không có thế quark-quark lẫn trạng thái liên kết quark nào được suy ra từ



HÌNH 136 Sự biến đổi của liên kết mạnh theo năng lượng, từ thực nghiệm và theo tính toán, cho thấy sự chính xác của Lagrangian QCD và sự tự do tiệm cận của tương tác mạnh (© Siegfried Bethke, Xem 193).

Lagrangian QCD bằng một phương pháp gần đúng *đơn giản*. Tuy vậy, các tính toán phức tạp không nhiễu loạn cho ta thấy rằng Lagrangian QCD không tính được lực giữa 2 hạt có màu, có cường độ không đổi (tương ứng với một thế tăng tuyến tính). Các tính toán này chứng tỏ rằng mô hình gần đúng theo thực nghiệm xưa kia của hadron là các quark được nối với nhau bằng các sợi dây hay là quark nằm trong túi, như ta thấy trong Hình 134, thật ra có thể được suy ra từ Lagrangian QCD. Tuy vậy, các tính toán này quá phức tạp nên không thể tóm tắt trong vài dòng. Mặt khác người ta có thể tìm lại giá trị lực không đổi này bằng máy tính trong đó người ta đã đơn giản hoá không-thời gian thành một mạng và rồi xấp xỉ QCD bằng *QCD mạng* hay *Lý thuyết chuẩn mạng*. Khi tính toán theo mô hình mạng người ta đã tìm lại được khối lượng của phần lớn các meson và baryon với độ chính xác thích hợp. Bằng cách sử dụng các máy tính điện tử mạnh nhất, các tính toán này đã cho giá trị khối lượng của proton và các baryon khác với sai số vài phần
Xem 192
trăm. Việc bàn luận về các tính toán phức tạp và hấp dẫn này nằm ngoài phạm vi của quyển sách.

Đúng ra khó khăn trong việc giải thích về sự giam giữ bằng các thuật ngữ đơn giản nhiều đến nỗi những bộ óc thông tuệ nhất cũng vẫn chưa làm được. Điều này không có gì lạ vì lời giải có lẽ cần phải có một lý thuyết thống nhất về các loại tương tác và cần nhất là sự thống nhất với lực hấp dẫn. Do đó ta để lại phần này cho phần cuối của cuộc hành trình.

Sự tự do tiệm cận

QCD có một đặc điểm khiến cho nó khác với QED: sự biến đổi của tương tác theo năng lượng. Đúng ra có 3 cách tương đương để mô tả cường độ liên kết mạnh. Cách thứ nhất là đại lượng xuất hiện trong Lagrangian QCD g_s. Cách thứ 2 thường được sử dụng là xác định đại lượng tương đương $\alpha_s = g_s^2/4\pi$. Cả α_s lẫn g_s đều phụ thuộc vào năng lượng Q của thí nghiệm. Nếu ta biết giá trị của chúng đối với một giá trị năng lượng thì ta sẽ biết giá trị của chúng đối với mọi giá trị năng lượng khác. Hiện nay trị thực nghiệm tốt nhất là $\alpha_s(M_Z) = 0.1185 \pm 0.0010$.

Sự phụ thuộc của liên kết mạnh vào năng lượng có thể tính được bằng phương pháp tái chuẩn hoá tiêu chuẩn và nó có giá trị là Xem 186, Xem 188

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{12\pi}{33 - 2n_f}\frac{1}{L}\left(1 - \frac{(918 - 114n_f)\ln L}{(33 - 2n_f)^2 L} + ...\right) \quad \text{trong đó} \quad L = \ln\frac{Q^2}{\Lambda^2(n_f)} \qquad (85)$$

với n_f là số quark có khối lượng nhỏ hơn mức năng lượng Q, tức là giữa 3 và 6. (Biểu thức này đã được khai triển tới các số hạng bậc cao nhờ các phần mềm đại số.)

Cách thứ 3 để mô tả liên kết mạnh là tham số năng lượng $\Lambda(n_f)$. Thí nghiệm đã cho ta giá trị $\Lambda(3)$ =230(60) GeV, $\Lambda(4)$ =180(50) GeV và $\Lambda(5)$ =120(30) GeV.

Các thí nghiệm trên máy gia tốc để đo lực liên kết cực kỳ phức tạp và hàng trăm người trên khắp thế giới đã làm việc trong nhiều năm để thu thập dữ liệu. Sự so sánh giữa QCD và thực nghiệm được trình bày trong Hình 136 không cho thấy một sự mâu thuẫn nào.

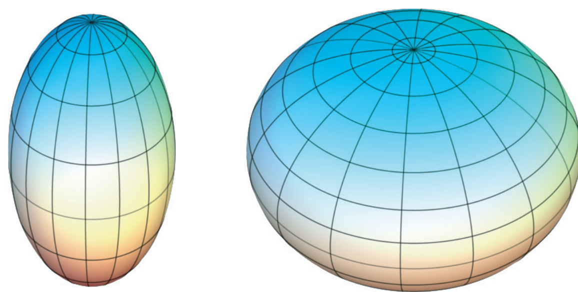
Hình 136 và biểu thức (85) minh hoạ cho *Sự tự do tiệm cận*: α_s giảm đi khi năng lượng tăng lên. Nói cách khác, khi năng lượng tăng, quark *thoát* khỏi tương tác mạnh; chúng hành xử như các hạt tự do.* Hệ quả của sự tự do tiệm cận trong QCD là ta chỉ có thể sử dụng một khai triển nhiễu loạn khi năng lượng lớn hơn Λ rất nhiều. Về mặt lịch sử, bản chất của việc khám phá hiện tượng tự do tiệm cận là xây dựng QCD thành một lý thuyết của tương tác mạnh.

Sự tự do tiệm cận có thể hiểu một cách định tính nếu xét trong QED. Ở khoảng cách nhỏ liên kết electron tăng lên vì sự che chắn của các cặp electron-positron ảo giảm đi nên ảnh hưởng của chúng giảm đi. Trong QCD, liên kết sắc tích hiệu dụng cũng thay đổi ở khoảng cách nhỏ do số các cặp quark-antiquark ảo giảm đi. Tuy vậy, các tính chất của gluon dẫn tới tác dụng ngược, *tác dụng phản che chắn* mạnh hơn: tính tổng cộng, liên kết mạnh hiệu dụng giảm đi khi khoảng cách giảm đi.

Kích thước và khối lượng của quark

Kích thước của quark, giống như kích thước của mọi hạt sơ cấp khác được QCD tiên đoán là 0, giống như trong mọi Thuyết trường lượng tử. Tính cho đến nay, chưa có thí nghiệm nào tìm thấy các hiệu ứng bắt nguồn từ kích thước hữu hạn của quark. Các thí nghiệm đều chứng tỏ rằng quark chắc chắn nhỏ hơn 10^{-19} m. Không có một lý thuyết nào đưa ra một giả định về kích thước như vậy. Trong mọi mô tả cho đến nay, Quark luôn được giả định là chất điểm hay nhiều nhất là kích thước Planck. Xem 194

* Sự tự do tiệm cận được Gerard 't Hooft khám phá năm 1972; vì ông đã nhận giải Nobel, giải năm 2004 đã được trao cho những người đã đóng góp cho việc làm rõ hiện tượng này: David Gross, David Politzer và Frank Wilczek, người đã nghiên cứu nhiều về nó năm 1973.



HÌNH 137 Một minh hoạ của hình ellipsoid dài (hình bên trái) và dẹt (hình bên phải) (© Sam Derbyshire).

Chúng ta nhắc lại rằng một phức hợp trung hoà của các hạt mang điện tích luôn luôn nhẹ hơn tổng khối lượng của các hạt thành phần. Nhưng nếu bạn tìm khối lượng của quark trong các bảng thì khối lượng của *u* và *d* chỉ vào cỡ vài MeV/c^2, trong khi khối lượng proton là 938 $\mathrm{MeV/c^2}$. Điều này phải hiểu như thế nào?

Hoá ra việc định nghĩa khối lượng của quark rắc rối hơn các hạt khác. Quark không bao giờ ở trạng thái tự do mà chỉ ở trong trạng thái liên kết. Kết quả là khái niệm khối lượng quark phụ thuộc vào quy chiếu để tính toán mà ta đang sử dụng.

Bắt nguồn từ *sự tự do tiệm cận*, quark chỉ hành xử như hạt tự do khi năng lượng lớn. Khối lượng của các hạt quark 'tự do' như vậy được gọi là *khối lượng quark thông dụng*; đối với các quark nhẹ nó chỉ có vài $\mathrm{MeV/c^2}$, như ta thấy trong Bảng 17.

Khi năng lượng thấp thí dụ như trong một proton, quark *không* được tự do nhưng lại có năng lượng lớn do quá trình giam giữ. Kết quả là các quark liên kết có *khối lượng quark thành phần* khá lớn do có tính đến năng lượng giam giữ. Để có khái niệm về các giá trị này, hãy lấy một proton; hệ thức bất định đối với một hạt trong một hình cầu bán kính 0.9 fm có độ bất định động lượng khoảng 190 MeV/c. Trong không gian 3 chiều điều này dẫn tới một năng lượng $\sqrt{3}$ lần giá trị đó, hay khối lượng quark thành phần khoảng 330 $\mathrm{MeV/c^2}$. Ba quark bị giam giữ sẽ nặng hơn một proton, có khối lượng 938 $\mathrm{MeV/c^2}$; như vậy ta có thể nói rằng một proton nhẹ hơn tổng các thành phần của nó.

Tóm lại, khối lượng của proton và neutron (hầu như) là động năng của các quark vì
Xem 195 khối lượng nghỉ của chúng gần như không đáng kể. Như Frank Wilczek đã nói, nhiều người lên cân mặc dù không bao giờ ăn món gì nặng.

Nhưng cũng có một lượng nhỏ khối lượng quark thông dụng đối với các quark up, down, strange và charm có mặt trong Lagrangian QCD tuỳ theo quy chiếu tính toán được sử dụng. Các giá trị của Bảng 17 là các giá trị đối với mức tái chuẩn hoá bằng 2 GeV. Khi
Xem 186 năng lượng còn phân nửa số đó, khối lượng tăng lên 35 %. Khối lượng các quark nặng được sử dụng trong sơ đồ $\overline{MS}$, một phương pháp đặc biệt để thực hiện việc khai triển nhiễu loạn.

Khối lượng, hình dạng và màu sắc của các proton

Xem 195 Frank Wilczek cho rằng một trong những kết quả chính của QCD, lý thuyết tương tác mạnh, dùng để giải thích các hệ thức khối lượng là

$$m_{\mathrm{proton}} \sim \mathrm{e}^{-k/\alpha} m_{\mathrm{Planck}} \quad \text{và} \quad k = 11/2\pi \,, \ \alpha_{\mathrm{unif}} = 1/25 \,. \tag{86}$$

Ở đây, hằng số liên kết α_{unif} được lấy ở mức năng lượng đại thống nhất, một hệ số nhỏ hơn năng lượng Planck 1000 lần. (Hãy xem phần đại thống nhất dưới đây). Nói cách khác, việc tìm hiểu tổng quát về khối lượng của các trạng thái liên kết trong tương tác mạnh, như proton, đòi hỏi một kiến thức thuần tuý về năng lượng thống nhất và hằng số liên kết ở mức năng lượng đó. Giá trị gần đúng $\alpha_{unif} = 1/25$ là một trị ngoại suy từ các giá trị năng lượng thấp bằng cách sử dụng các dữ liệu thực nghiệm. Tính hệ số tỷ lệ k trong biểu thức (86) không phải là điều dễ dàng. Người ta thường xác định nó trên máy tính bằng cách sử dụng QCD mạng.

Trang 268

Nhưng khối lượng không phải là tính chất duy nhất của proton. Đám mây của quark và gluon cũng có hình dạng. Điều đáng ngạc nhiên là phải mất một thời gian dài trước khi người ta bắt đầu quan tâm đến phương diện này. Proton, được tạo ra từ 2 quark up và down, tương tự một phân tử H_2^+ bị ion hoá, nơi có một electron tạo thành đám mây bao quanh 2 proton. Điều hiển nhiên là phân tử H_2^+ *bị kéo dài*, như trong Hình 137.

Proton có bị kéo dài không? Người ta chưa đo được độ phi cầu hay moment tứ cực của proton bằng quang phổ kế. Tuy vậy, proton có một moment tứ cực *riêng*. Moment tứ cực của proton và neutron được tìm thấy là dương trong mọi phương pháp tính toán đã biết, cho thấy chúng có hình dạng *thon dài*. Các thí nghiệm gần đây ở phòng thí nghiệm Jefferson đã khẳng định điều này. Người ta đã tiên đoán tất cả baryon với $J = 1/2$ có hình dạng thon dài, trái với baryon $J = 3/2$ có hình dạng dẹt. Meson giả vô hướng có spin 0 được tiên đoán là có hình dạng thuôn dài, trong khi meson vector có spin 1 được cho là có hình dạng dẹt.

Xem 196

Hình dạng của một phân tử bất kỳ sẽ phụ thuộc vào việc các phân tử khác có bao quanh nó hay không. Tương tự như vậy, những nghiên cứu gần đây cho thấy rằng kích thước và hình dạng của proton trong hạt nhân có thay đổi chút ít; cả hai tính chất này hình như phụ thuộc vào hạt nhân mà proton đã tạo nên.

Xem 197

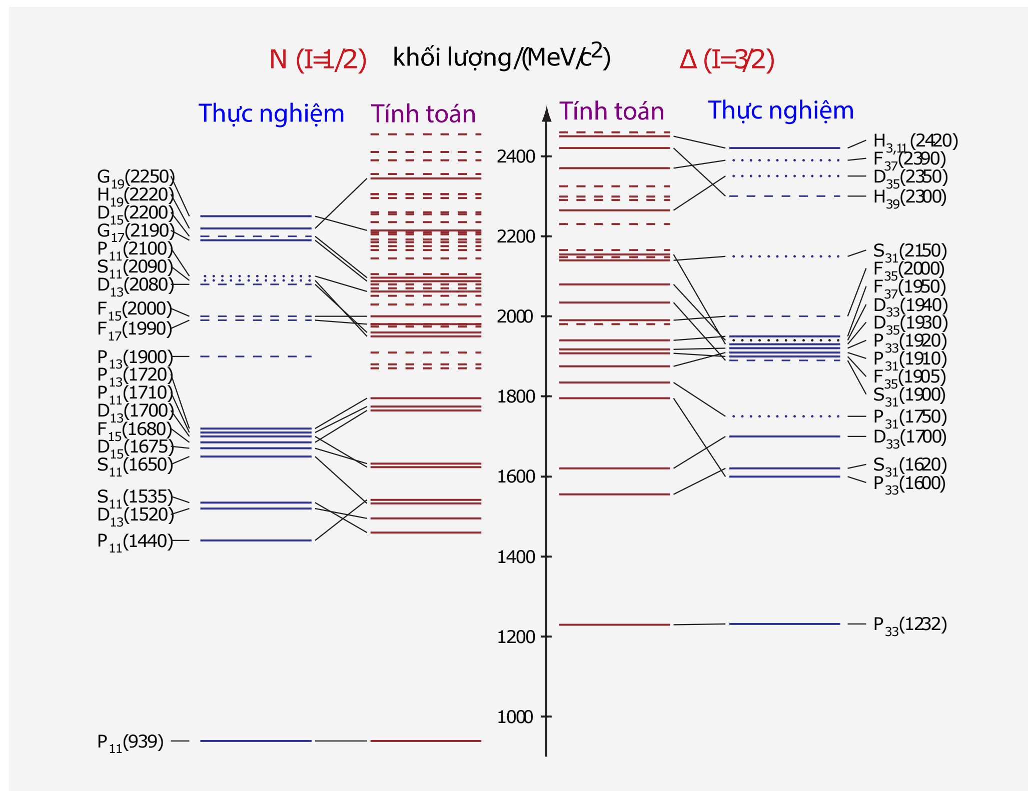
Ngoài hình dạng, các phân tử cũng có màu. Màu của phân tử, giống như mọi vật khác, bắt nguồn từ năng lượng mà chúng hấp thu khi bị chiếu xạ. Phân tử H_2^+ có thể hấp thu một ánh sáng có tần số nào đó bằng cách chuyển sang trạng thái kích thích. Các phân tử thay đổi khối lượng khi chúng hấp thu ánh sáng; trạng thái kích thích nặng hơn trạng thái cơ bản. Tương tự như vậy, proton và neutron cũng có thể bị kích thích. Các trạng thái kích thích của chúng đã được nghiên cứu kỹ. Một bản tóm tắt cũng cho thấy sự giới hạn của cách tiếp cận này, được trình bày trong Hình 138. Nhiều trạng thái kích thích có thể giải thích là các trạng thái quark bị kích thích nhưng người ta tiên đoán còn nhiều trạng thái nữa. Các khối lượng tính được phù hợp với các thí nghiệm trong phạm vi sai số 10 %. Mô hình quark và QCD đã xây dựng và giải thích được phần lớn phổ của baryon; nhưng sự phù hợp thì chưa hoàn hảo.

Xem 186

Điều hiển nhiên là trong môi trường thường ngày của chúng ta, không cần năng lượng để kích thích nucleon – đúng ra trong Mặt trời cũng không có – và những trạng thái kích thích này có thể bỏ qua. Chúng chỉ xuất hiện trong các máy gia tốc hạt và trong tia vũ trụ. Theo một nghĩa nào đó, có thể nói rằng, trong góc vũ trụ của chúng ta, thường không thấy được màu sắc của proton.

Những điều kỳ lạ về tương tác mạnh.

Nói về sự tương tự người ta thường so sánh QCD với hiện tượng siêu dẫn. Bảng 18 cho ta một tổng quan về sự tương ứng này.



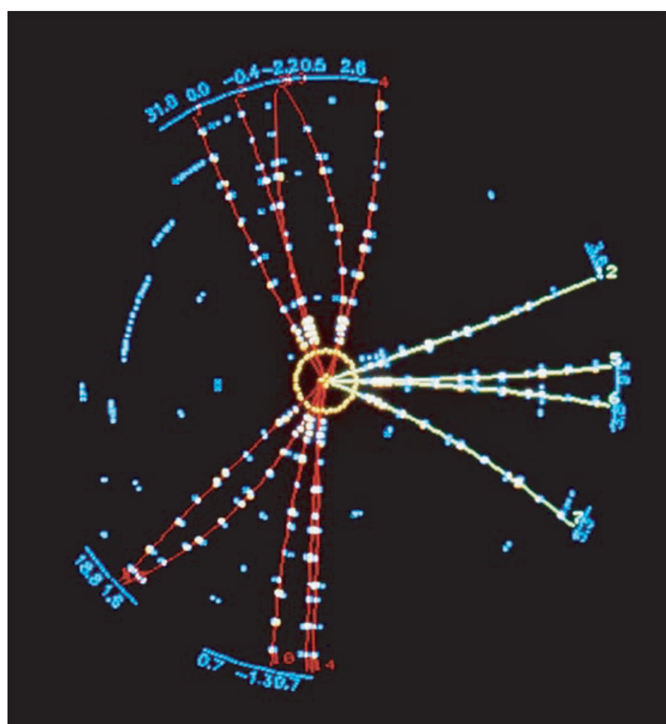
HÌNH 138 Khối phổ của các trạng thái kích thích của proton: các giá trị thực nghiệm và tính toán (Xem 186).

BẢNG 18 Sự tương ứng giữa QCD và hiện tượng siêu dẫn.

QCD	Hiện tượng siêu dẫn
Quark	đơn cực từ
Tính phi tuyến của lực màu	tương tác Electron–mạng
Ống sắc điện thông	ống từ thông
lực hút Gluon-gluon	lực hút electron–electron
Glueball	cặp Cooper
Tính không ổn định của chân không trần	tính không ổn định của mặt Fermi trần
Đối xứng tâm rời rạc	đối xứng U(1) liên tục
Nhiệt độ cao phá vỡ sự đối xứng	nhiệt độ thấp phá vỡ sự đối xứng

* *

Các tính toán bằng máy tính để trích xuất các dữ liệu từ Lagrangian Sắc động lực học lượng tử là các tính toán thuộc loại phức tạp nhất mà người ta đã từng thực hiện. Chúng hơn hẳn việc tiên đoán thời tiết, mô phỏng lưu chất nhưng giống nhau về quy mô tính toán. Không ai biết được là điều này có cần thiết cho tương lai hay không: cuộc chạy đua để phát minh các phương pháp tìm kiếm lời giải gần đúng đơn giản vẫn còn tiếp diễn.



HÌNH 139 Một sự kiện 3 tia, quan sát được tại máy gia tốc va chạm PETRA ở Hamburg, Đức. Sự kiện này được một va chạm electron-positron kích khởi, cho phép ta phát hiện sự phân rã của một gluon và đo được spin của nó (© DESY).

* *

Mặc dù gluon không có khối lượng giống photon và graviton, *không có* bức xạ màu trong thiên nhiên. Gluon mang màu sắc và tương tác với nhau; kết quả là gluon tự do được cho là trực tiếp phân rã thành các cặp quark–antiquark.

Năm 1979, những phân rã rõ ràng và đầu tiên của *gluon* đã được quan sát thấy tại máy Xem 191 gia tốc va chạm PETRA ở Hamburg. Việc xuất hiện của *các tia gluon* bắt nguồn từ sự phân rã của các gluon năng lượng cao thành các chùm hạt hẹp. Các tia gluon xuất hiện trong sự kiện 3 tia đồng phẳng. Tốc độ quan sát được và các tính chất khác của những sự kiện này đã khẳng định các điều tiên đoán của QCD. Các thí nghiệm ở PETRA cũng đã xác định spin $S = 1$ của gluon và sự thay đổi của hằng số liên kết mạnh. Người hùng của thời đó là giám đốc dự án Gustav-Adolf Voss, người đã hoàn thành máy gia tốc với ngân sách đã cho, trước thời hạn 6 tháng.

* *

Năm 1997 có lẽ người ta đã tìm được thực thể tương đương với bức xạ màu nhưng có phần kỳ lạ hơn. Nó là meson vô hướng có khối lượng 1.5 GeV/c^2 và là một *glueball*. Đây là một meson theo giả thuyết chỉ gồm các gluon. Kết quả tính từ lý thuyết chuẩn mạng Xem 198 hình như khẳng định sự có mặt của một glueball có khối lượng như vậy. Sự hiện hữu của glueball vẫn còn nằm trong sự tranh luận quyết liệt.

* *

Có một sự nhất trí đang lan rộng là phần lớn các meson vô hướng dưới 1 GeV/c^2 là các

Xem 199 *tetraquark*. Năm 2003, thí nghiệm cũng cho thấy có các ứng viên tetraquark nặng hơn, cụ thể là X(3872), Ds(2317) và Ds(2460). Thời gian sắp tới sẽ chứng minh điều này đúng hay sai.

* *

Có các hạt được tạo thành từ 5 quark, tức là *pentaquark* không? Cho tới nay hình như chúng chỉ hiện hữu tại vài phòng thí nghiệm ở Nhật chứ chưa thấy ở nơi khác. Nhiều Xem 200 nhà nghiên cứu còn không tin ở kết quả này.

* *

Khi ta nhìn vào bảng phân loại tuần hoàn các nguyên tố là ta đang nhìn vào sự thể hiện của tương tác mạnh. Lagrangian của tương tác mạnh mô tả nguồn gốc và tính chất của 118 nguyên tố mà ta đã biết.

Tuy vậy vấn đề chính của hạt nhân lại do tương tác điện từ giải đáp. Tại sao chỉ có khoảng 118 nguyên tố khác nhau? Vì hằng số liên kết điện từ α gần bằng 1/137.036. Nếu điện tích của hạt nhân lớn hơn 137 nhiều thì điện trường quanh hạt nhân sẽ dẫn tới sự sinh cặp electron–positron tự phát; electron sinh ra sẽ rơi vào hạt nhân và biến đổi proton thành neutron, như vậy sẽ ngăn số proton tăng lên. Như vậy số các nguyên tố là hữu hạn bắt nguồn từ tương tác điện từ.

* *

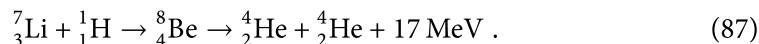
Để biết thêm về phóng xạ, tác dụng và sự nguy hiểm của nó, những điều mà chính phủ có thể làm, hãy xem website, bằng tiếng Anh và Đức, của Văn phòng liên bang phòng chống bức xạ www.bfs.de.

* *

Từ năm 1990 trở đi, người ta thường cho rằng các quốc gia nghèo nàn đang tạo ra vũ Câu đố 133 s khí hạt nhân. Tại sao lại xảy ra một điều khó tin như vậy?

* *

Về mặt lịch sử, phản ứng hạt nhân cho ta một thử nghiệm đầu tiên về hệ thức $E = c^2\gamma m$. Cockcroft và Walton đã làm được điều này năm 1932. Họ chứng minh rằng khi bắn proton vào lithium ta sẽ có phản ứng



$$^7_3\mathrm{Li} + {}^1_1\mathrm{H} \rightarrow {}^8_4\mathrm{Be} \rightarrow {}^4_2\mathrm{He} + {}^4_2\mathrm{He} + 17\,\mathrm{MeV}\ . \qquad (87)$$

Năng lượng đo được bên vế phải giống với giá trị tính được từ hiệu khối lượng toàn phần của hạt nhân ở 2 vế.

* *

Phần lớn các nhà nghiên cứu đều cho rằng QCD được xác định bởi *2* tham số. Ngoài hằng số liên kết, người ta cũng có thể tính tham số CP mạnh. Thật vậy, tương tác mạnh có thể vi phạm tính bất biến CP. Sự vi phạm này sẽ được mô tả bằng số hạng thứ 2 trong Lagrangian; cường độ của nó được mô tả bằng tham số thứ 2, một phase ký hiệu là θ_{CP}. Tuy đã có nhiều thí nghiệm chính xác được thực hiện để tìm kiếm sự vi phạm này nhưng người ta vẫn chưa phát hiện sự vi phạm CP trong tương tác mạnh.

Tóm tắt về QCD và các vấn đề chưa giải quyết

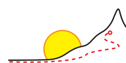
Sắc động lực học lượng tử, lý thuyết chuẩn không Abel dựa trên Lagrangian với đối xứng SU(3), mô tả các tính chất của gluon, quark, proton, neutron và mọi hadron khác, tính chất hạt nhân nguyên tử, sự hoạt động của sao và nguồn gốc các nguyên tử trong cơ thể chúng ta và chung quanh ta. Không có tương tác mạnh, ta không thể có da thịt và hình hài. Mọi phương diện của thiên nhiên đều là kết quả của một con số đơn giản, hằng số liên kết mạnh và đối xứng chuẩn SU(3).

Tương tác mạnh chỉ tác dụng trên quark và gluon. Nó bảo toàn các loại hạt, sắc tích, điện tích, nhược tích, spin, cũng như tính chẵn lẻ C, P và T.

QCD và thí nghiệm rất phù hợp với nhau. QCD là sự mô tả tương tác mạnh một cách hoàn hảo. Các giới hạn của QCD chỉ thuộc về nhận thức. Giống như trong mọi thuyết trường lượng tử, cũng là trường hợp của QCD, dạng thức toán học của Lagrangian hầu như được xác định một cách duy nhất theo yêu cầu của tính tái chuẩn hoá được, tính bất biến Lorentz và tính bất biến chuẩn – trong trường hợp này là SU(3). Ta nói 'hầu như', vì Lagrangian, dù mô tả đúng mọi thí nghiệm nhưng vẫn chưa giải thích được một vài tham số:

— Con số 6 và khối lượng m_q của quark.
— Hằng số liên kết của tương tác mạnh g_s, hay tương đương, α_s hay Λ. QCD tiên đoán được sự phụ thuộc vào năng lượng nhưng chưa tiên đoán được giá trị tuyệt đối của nó.
— Về mặt thực nghiệm, tương tác mạnh cho thấy có bảo toàn CP. Điều này không phải là hiển nhiên; Lagrangian QCD giả sử rằng mọi số hạng vi phạm CP khả hữu đều bằng 0, ngay cả khi số hạng Lagrangian vi phạm CP là số hạng bất biến Lorentz, số hạng bất biến chuẩn và số hạng có thể tái chuẩn hoá được.
— Các tính chất của không-thời gian, đặc biệt là bất biến Lorentz, tính liên tục và số chiều của nó được giả sử ngay từ đầu và dĩ nhiên là không thể giải thích được.
— Người ta cũng không biết cách điều chỉnh QCD trong trường hấp dẫn mạnh cũng như trong không-thời gian cong nhiều.

Ta sẽ tìm hiểu cách vượt qua các giới hạn này trong phần cuối cuộc hành trình. Trước khi làm điều đó, ta hãy xem các tương tác hạt nhân khác trong thiên nhiên.



Chương 8

Tương tác hạt nhân yếu và sự thuận tay của thiên nhiên

Tương tác kỳ dị nhất trong thiên nhiên là tương tác yếu. Tương tác yếu biến đổi các hạt sơ cấp thành các hạt sơ cấp khác, có hạt bức xạ có khối lượng, vi phạm tính bảo toàn chẵn lẻ và đối đãi với bên phải và bên trái khác nhau. Cũng may là ta không trải nghiệm qua tương tác yếu trong đời sống hằng ngày, vì tính chất của nó vi phạm mạnh đến những điều ta quen thuộc. Sự khác thường này khiến cho tương tác yếu trở thành tương tác hấp dẫn nhất trong 4 loại tương tác trong thiên nhiên.

Sự biến đổi của các hạt sơ cấp

Hiện tượng phóng xạ đặc biệt được gọi là phân rã β, là một hiện tượng kỳ dị. Những thí nghiệm trong thập niên 1910 cho thấy khi nguồn β phát xạ electron, nguyên tử được *biến đổi* từ nguyên tố này sang nguyên tố khác. Thí dụ như thí nghiệm trong Hình 140 cho ta thấy tritium, đồng vị của hydrogen, phân rã thành helium theo phản ứng



$$ {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + e^{-} + \overline{\nu}_{\mathrm{e}} \,. \qquad (88)$$

Đúng ra những nguyên tố mới xuất hiện trong mọi phân rã β. Trong thập niên 1930 thì rõ ràng là quá trình biến đổi bắt nguồn từ 1 neutron trong hạt nhân biến thành 1 proton (và hơn nữa):



$$ n \rightarrow p + e^{-} + \overline{\nu}_{\mathrm{e}} \,. \qquad (89)$$

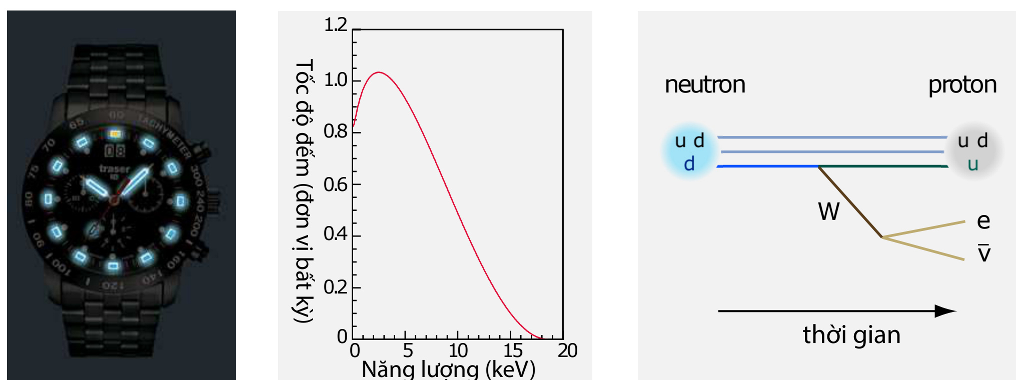
Phản ứng này giải thích cho mọi phân rã β. Trong thập niên 1960, mô hình quark chứng tỏ rằng phân rã β đúng ra là bắt nguồn từ quark down biến thành quark up:



$$ d \rightarrow u + e^{-} + \overline{\nu}_{\mathrm{e}} \,. \qquad (90)$$

Phản ứng này giải thích cho sự biến đổi của 1 neutron – trạng thái *udd* – thành 1 proton – trạng thái *uud*. Tóm lại, các hạt vật chất có thể biến đổi qua lại. Chúng ta cũng nên nhớ rằng sự biến đổi này khác với các quá trình khác xảy ra trong hạt nhân. Trong sự dung hợp, phân hạch hay phân rã α, mặc dù hạt nhân thay đổi nhưng mọi neutron và proton vẫn giữ nguyên. Trong phân rã β, các hạt sơ cấp có thể thay đổi được. Giấc mơ của Democritus và Leucippus về các viên gạch xây dựng cơ bản không thay đổi được *rõ ràng không thể* trở thành hiện thực trong thiên nhiên.

Thí nghiệm chứng tỏ rằng các biến đổi của quark không thể đạt được bằng trường điện từ, trường gluon, hay trường hấp dẫn. Phải có một loại bức xạ khác trong thiên



HÌNH 140 Phân rã β trong tritium: đồng hồ dạ quang tritium hiện đại, phổ năng lượng liên tục của electron phát xạ từ tritium và quá trình xảy ra trong hạt nhân tritium (© Traser, Katrin collaboration).

nhiên và đó là tương tác thứ 4. Cũng không phải là các biến đổi hoá học, nếu không thì ta sẽ phải bận rộn với các thành phần hoá học thay đổi. Tương tác thứ 4 này *yếu*. Vì các quá trình biến đổi này được thấy trong hạt nhân lần đầu tiên nên tương tác được gọi là *tương tác hạt nhân yếu*.

Trong phân rã β, tương tác hạt nhân yếu biến đổi các quark qua lại. Đúng ra tương tác hạt nhân yếu cũng có thể biến đổi các lepton qua lại, thí dụ như muon thành electron. Nhưng năng lượng toả ra trong phân rã β đi về đâu? Những thí nghiệm vào năm 1911 chứng tỏ rằng phổ năng lượng của các electron phát xạ là *liên tục*. Điều này được minh hoạ trong Hình 140. Điều này đã xảy ra như thế nào? Năm 1930, thiên tài Wolfgang Pauli đã giải thích thí nghiệm này bằng một giả thuyết táo bạo: năng lượng phân rã được phân ra cho electron và một hạt mới, một điều đáng kinh ngạc, đó là *neutrino* – nói chính xác hơn, anti-neutrino electron $\bar{\nu}_e$. Để ăn khớp với dữ liệu, neutrino phải không có điện tích, không tương tác mạnh và có khối lượng rất nhỏ. Kết quả là neutrino rất ít tương tác với vật chất thông thường và thường bay xuyên qua Trái đất mà không gây ra ảnh hưởng gì. Tính chất này khiến cho việc phát hiện ra chúng rất khó nhưng không phải là không thể được; sau cùng nó đã được phát hiện vào năm 1952. Sau đó, người ta khám phá ra là có 3 loại neutrino, bây giờ được gọi là neutrino electron, neutrino muon và neutrino tau, Trang 242 mỗi loại đều có phản hạt của nó. Để có một tóm tắt về các nỗ lực thực nghiệm này, hãy xem Bảng 19.

Tính chất yếu của tương tác hạt nhân yếu

Từ thí nghiệm phân rã β và mô hình quark, các nhà vật lý nhanh chóng kết luận rằng phải có một hạt trung gian mang tương tác hạt nhân yếu, tương tự như photon mang tương tác điện từ. 'Bức xạ yếu' này, khác với các loại bức xạ khác kể cả các hạt *có khối lượng*.

▷ Có 2 loại hạt bức xạ yếu: boson trung hoà Z khối lượng 91.2 GeV – gần bằng khối lượng nguyên tử bạc – và boson W có mang điện, khối lượng 80.4 GeV.

BẢNG 19 Lepton: 3 loại neutrino và 3 loại lepton có điện tích (phản hạt có điện tích Q và số chẵn lẻ P ngược dấu).

Neutrino	Khối lượng m và phân rã (xem sách)	Spin J số chẵn lẻ P	Sắc tích; nhược tính	Điện tích Q, spin đồng vị I, số lạ S, số duyên C, số đẹp B', số đỉnh T	Số lepton L, số baryon B
Neutrino electron ν_e	$< 2\,\mathrm{eV}/c^2$, dao động	$\frac{1}{2}^+$	trắng; bộ đơn, bộ đôi	0, 0, 0, 0, 0, 0	1, 0
Neutrino muon ν_e	$< 2\,\mathrm{eV}/c^2$, dao động	$\frac{1}{2}^+$	trắng; bộ đơn, bộ đôi	0, 0, 0, 0, 0, 0	1, 0
Neutrino tau ν_e	$< 2\,\mathrm{eV}/c^2$, dao động	$\frac{1}{2}^+$	trắng; bộ đơn, bộ đôi	0, 0, 0, 0, 0, 0	1, 0
Electron e	0.510 998 928(11) MeV/c^2, bền	$\frac{1}{2}^+$	trắng; bộ đơn, bộ đôi	−1, 0, 0, 0, 0, 0	1, 0
Muon μ	105.658 3715(35) MeV/c^2, c. 99 % $e\bar{\nu}_e\nu_\mu$	$\frac{1}{2}^+$	trắng; bộ đơn, bộ đôi	−1, 0, 0, 0, 0, 0	1, 0
Tau τ	1.776 82(16) GeV/c^2, c. 17 % $\mu\bar{\nu}_\mu\nu_\tau$, c. 18 % $e\bar{\nu}_e\nu_\tau$	$\frac{1}{2}^+$	trắng; bộ đơn, bộ đôi	−1, 0, 0, 0, 0, 0	1, 0

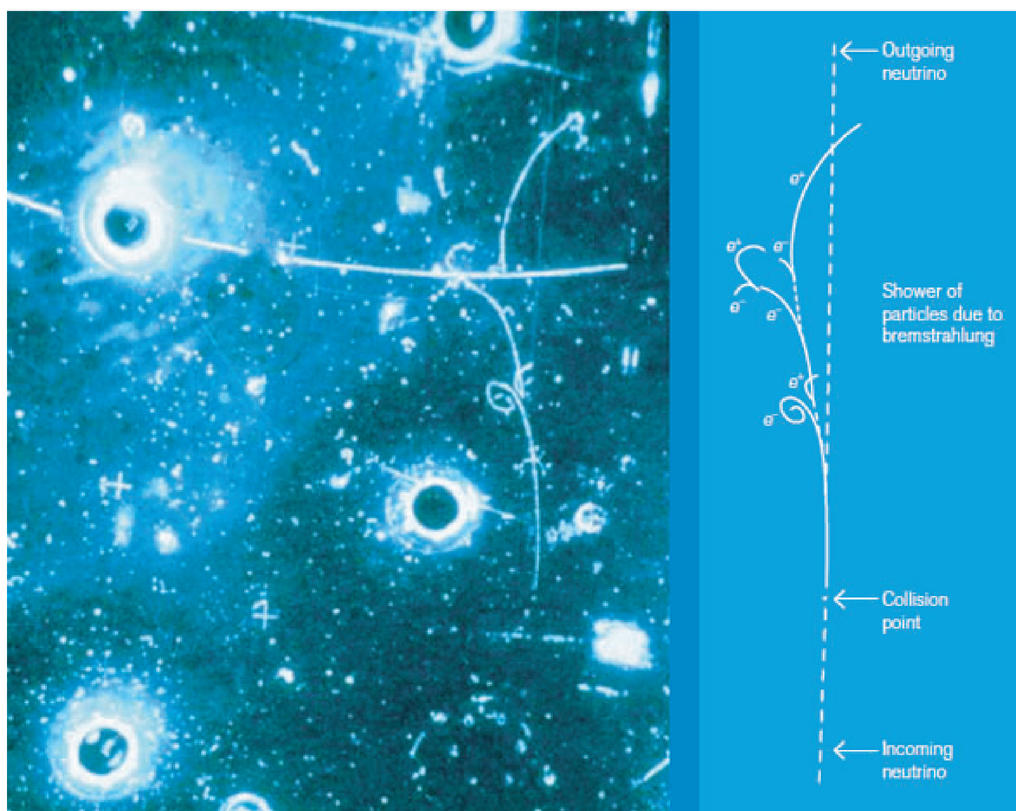
BẢNG 20 Boson vector trung gian của tương tác yếu (boson Z là phản hạt của chính nó; boson W có phản hạt mang điện trái dấu).

Boson	Khối lượng m	Spin J	Sắc tích; nhược tính	Điện tích Q, spin đồng vị I, số lạ S, số duyên C, số đẹp B', số đỉnh T	Số lepton L, số baryon B
boson Z	91.1876(21) GeV/c^2	1	trắng; ‘bộ ba’	0, 0, 0, 0, 0, 0	0, 0
boson W	80.398(25) GeV/c^2	1	trắng; ‘bộ ba’	1, 0, 0, 0, 0, 0	0, 0

Các boson W và Z còn được gọi là các *boson vector yếu* hay *boson trung gian yếu*.

Khối lượng của các boson vector yếu lớn đến nỗi bức xạ yếu tự do chỉ hiện hữu trong một thời gian rất ngắn khoảng 0.1 ys rồi phân huỷ. Khối lượng lớn cũng là lý do tương tác yếu có tầm rất ngắn nên rất yếu. Thật vậy, sự trao đổi các hạt trung gian ảo tỷ lệ với khối lượng của hạt theo hàm mũ âm. Một số tính chất phụ được cho trong Bảng 20. Đúng ra tương tác yếu yếu đến nỗi neutrino, hạt *chỉ* tương tác một cách yếu ớt, có một xác suất rất lớn để bay xuyên qua Mặt trời mà không tương tác một chút nào.

Sự hiện hữu của boson vector trung gian có khối lượng và điện tích, ngày nay được gọi là W, đã được tiên đoán từ thập kỷ 1940; nhưng các nhà vật lý lý thuyết không chấp



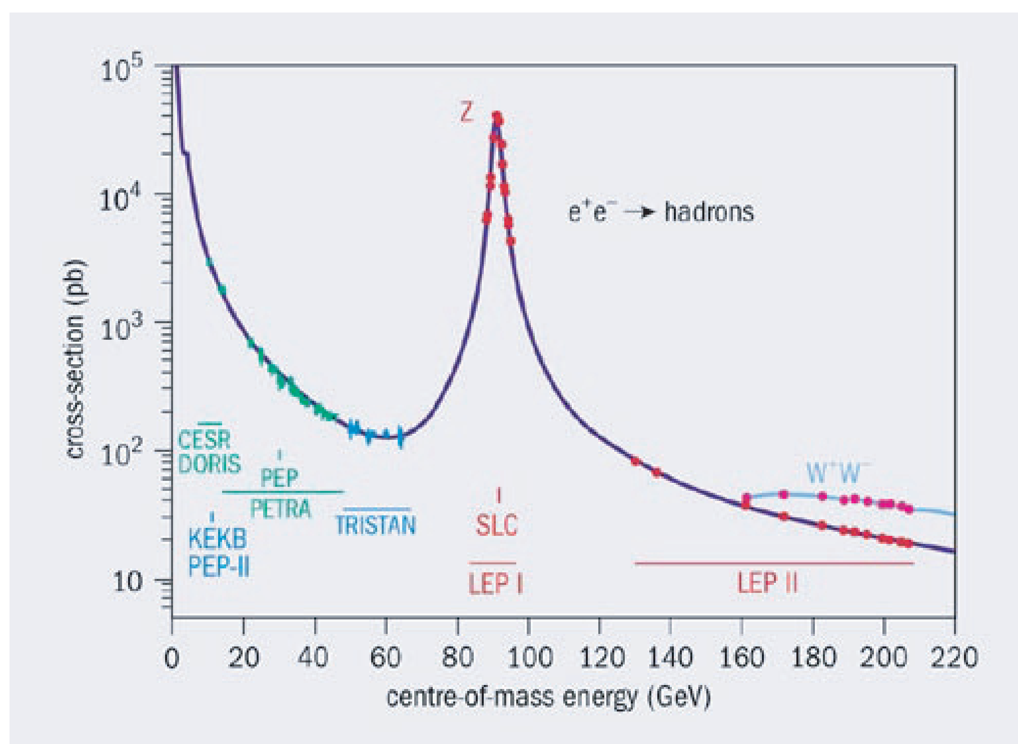
HÌNH 141 Lần quan sát đầu tiên của boson Z ảo: chỉ có những dòng yếu trung hoà cho phép một neutrino va chạm với một electron trong buồng bọt rồi lại ra đi (© CERN).

nhận ý tưởng này cho đến khi các vật lý gia Hoà Lan Martin Veltman và Gerard 't Hooft chứng minh rằng có thể có một hạt như vậy mà không mâu thuẫn gì với phần lý thuyết còn lại. Nhờ chứng minh này họ đã được giải Nobel vật lý – sau nhiều thí nghiệm khẳng định điều tiên đoán của họ.

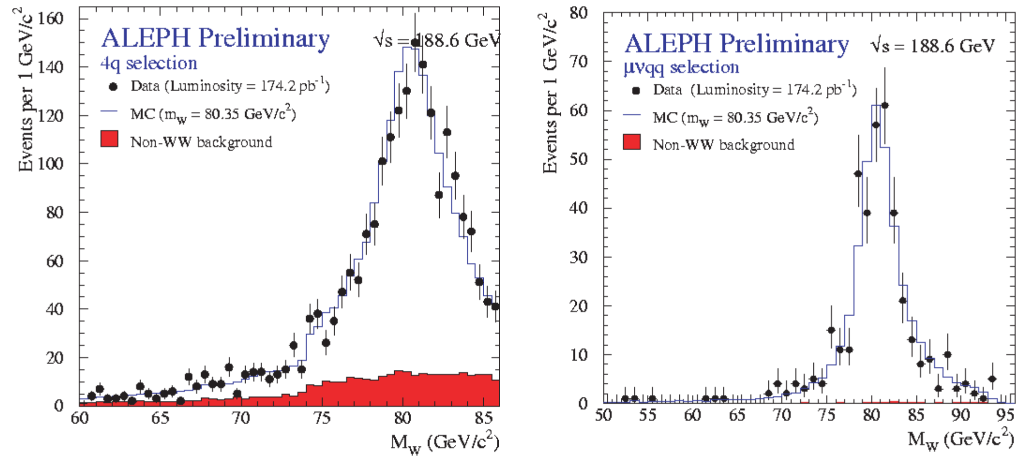
Sự hiện hữu của một boson vector trung gian *trung hoà* có khối lượng, boson Z, chỉ được Salam, Weinberg và Glashow tiên đoán sau boson W khá lâu. Về mặt thực nghiệm, boson Z được quan sát lần đầu tiên như là một hạt *ảo* vào năm 1973 tại CERN, Geneva. Sự khám phá được thực hiện bằng cách quan sát, từng ảnh một, trên 700 000 ảnh chụp ở buồng bọt Gargamelle. Người ta chỉ tìm ra vài tấm ảnh thú vị; tấm nổi tiếng nhất là tấm trong Hình 141.

Năm 1983, các nhóm của CERN đã tạo ra và phát hiện lần đầu tiên các boson W và Z *thật*. Thí nghiệm này là nỗ lực trong 5 năm làm việc cùng nhau của hàng ngàn người. Kết quả được tóm tắt trong Bảng 20. Giám đốc dự án đầy quyết đoán, Carlo Rubbia, một người nóng tính khiến cho trung bình cứ sau 3 tuần thì có một thư ký nghỉ việc, và chuyên gia kỹ thuật chính, Simon van der Meer, đã nhận giải Nobel vật lý năm 1984 nhờ khám phá này. Điều này lại khẳng định một lần nữa, một 'định luật' của thiên nhiên, là boson được khám phá ở châu Âu và fermion ở châu Mỹ. Các dữ liệu đơn giản nhất về Z và W được trình bày trong Hình 142 và Hình 143; cả 2 kết quả đều là dữ liệu về thiết





HÌNH 142 Hình trên: SPS, máy gia tốc va chạm proton–antiproton ở CERN, với chu vi 7 km, đã được sử dụng trong thí nghiệm đầu tiên về W và Z thật. Hình dưới: dữ liệu đơn giản đẹp đẽ của Z do LEP, một máy thế hệ sau, ghi nhận (© CERN)



HÌNH 143 Số đo của khối lượng boson W do LEP ghi nhận (© CERN)

diện ngang của va chạm electron-positron ở LEP, 10 năm sau khám phá đầu tiên.

Tương tự như photon được các điện tích có gia tốc phát xạ, W và Z được các nhược tích có gia tốc phát xạ. Bắt nguồn từ khối lượng lớn của W và Z, gia tốc phải rất lớn, vì vậy chúng chỉ được tìm thấy trong các phân rã hạt nhân và trong các va chạm giữa các hạt. Tuy vậy, W và Z, ngoài khối lượng và nhược tích, đều giống photon trong phần lớn các phương diện khác. Đặc biệt, W và Z quan sát được đều là các hạt sơ cấp. Thí dụ như tỷ số hồi chuyển từ của W là giá trị đã được tiên đoán đối với các hạt sơ cấp. Xem 186

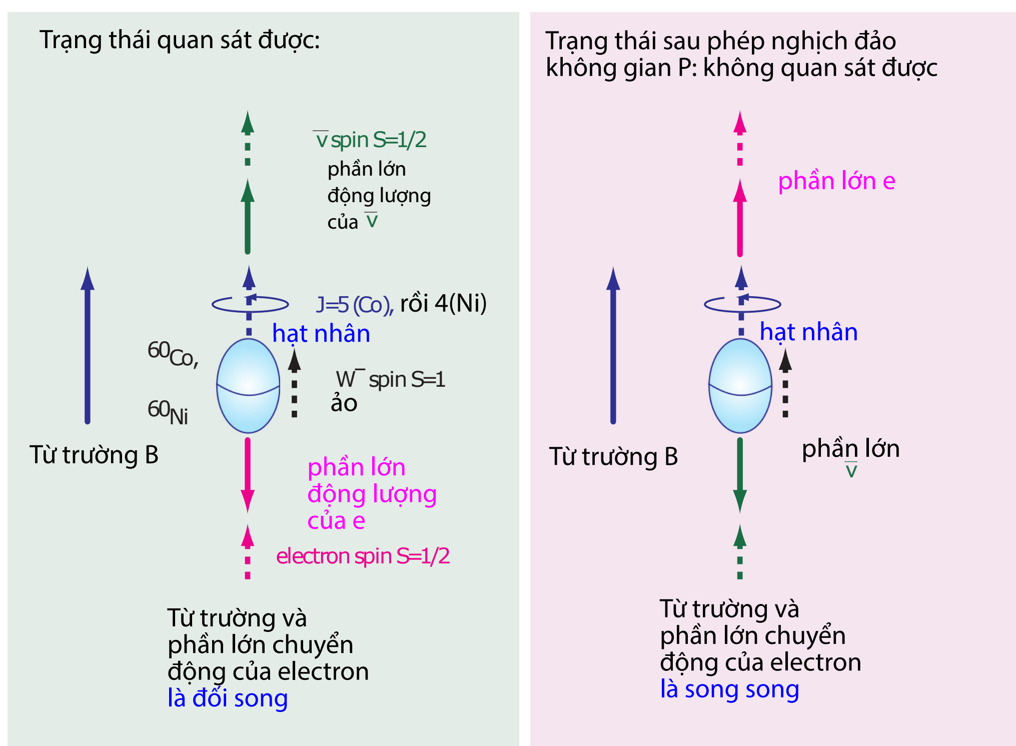
Sự phân biệt trái với phải

Một đặc tính kỳ quái khác của tương tác yếu là không bảo toàn tính chẵn lẻ P qua phép nghịch đảo không gian. Tương tác yếu phân biệt các hệ thống gương; điều này khác với cuộc sống hằng ngày, sự hấp dẫn, hiện tượng điện từ và tương tác mạnh. Tính không bảo toàn tính chẵn lẻ của tương tác yếu đã được Lee Tsung-Dao và Yang Chen Ning tiên đoán vào năm 1956 để giải thích cho khả năng meson K^0 có lúc phân rã thành 2 pion có tính chẵn và có lúc lại phân rã thành 3 pion có tính lẻ. Xem 202

Lee và Yang đã đề nghị Wu Chien-Shiung tiến hành một thí nghiệm. * Thí nghiệm mà bà và cộng sự thực hiện được biểu diễn trên Hình 144. Vài tháng sau cuộc họp đầu tiên với Lee và Yang, Wu và cộng sự đã thấy rằng trong phân rã β của hạt nhân cobalt dọc theo từ trường, phần lớn các electron phát xạ *ngược với* spin của hạt nhân. Trong thí nghiệm với tính chẵn lẻ nghịch đảo, lẽ ra electron phải phát xạ *cùng hướng* với spin thì lại không thấy xảy ra. Tính chẵn lẻ bị vi phạm. Điều này đã mang lại cho Lee và Yang giải Nobel năm 1957.

Như vậy tính chẵn lẻ bị vi phạm trong tương tác yếu. Sự vi phạm này không chỉ xảy ra trong phân rã β mà nó còn xảy ra trong phân rã muon và trong các quá trình tương tác yếu khác. Đặc biệt, khi 2 electron va chạm, những va chạm thông qua tương tác yếu

* Wu Chien-Shiung (b. 1912 Shanghai, d. 1997 New York) được các đồng nghiệp gọi là 'madame Wu'. Bà là một vật lý gia thông minh, năng động, gốc Trung quốc. Bà cũng nghiên cứu về vũ khí hạt nhân; cuối đời bà là hội trưởng của Hội vật lý Hoa kỳ.

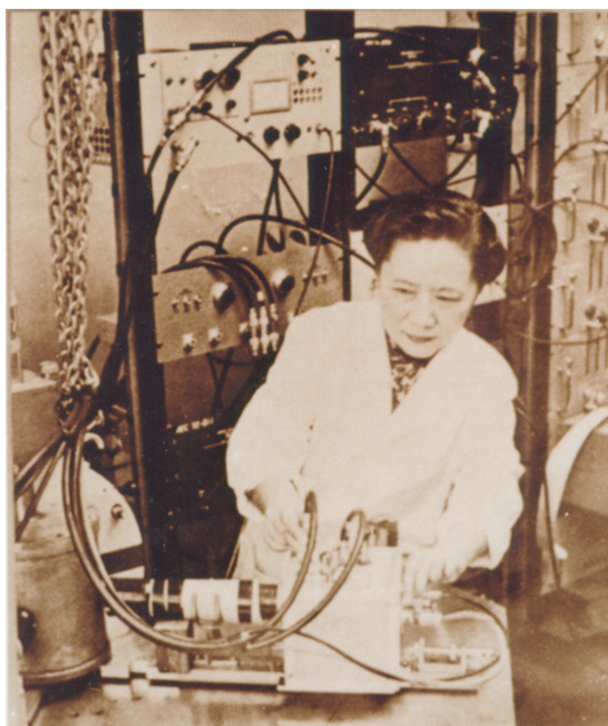


HÌNH 144 Diễn biến của phân rã β theo thực nghiệm, và diễn biến theo tưởng tượng, qua phép biến đổi nghịch đảo không gian P (tương đương với một phép phản xạ gương cộng với một phép quay một góc π quanh trục vuông góc với mặt gương).

sẽ hành xử khác với trường hợp trong một thí nghiệm đối xứng gương. Số thí nghiệm Xem 203 chứng minh cho điều này càng ngày càng nhiều. Trong năm 2004, 2 chùm electron bị phân cực – một quay trái và một quay phải – được bắn vào một bia vật chất và người ta đếm số electron bị phản xạ. Sự khác nhau là 0.175 phần của 1000000 – tuy nhỏ nhưng đo được. Thí nghiệm cũng khẳng định giá trị −0.046 là nhược tích của electron.

Một hệ quả đẹp đẽ của sự vi phạm tính chẵn lẻ là ảnh hưởng của nó lên *màu sắc* Xem 204 của các nguyên tử. Tiên đoán này được Bouchiat đưa ra vào năm 1974. Tương tác yếu được kích khởi bởi nhược tích của electron và hạt nhân; do đó, electron trong nguyên tử không những chỉ trao đổi các photon ảo với hạt nhân mà còn trao đổi các hạt Z ảo. Xác suất trao đổi Z ảo rất nhỏ, khoảng 10^{-11} lần nhỏ hơn sự trao đổi các photon ảo. Nhưng vì tương tác yếu không bảo toàn tính chẵn lẻ nên quá trình này cho phép electron chuyển mức, là điều không thể xảy ra nếu chỉ có trường điện từ thuần tuý. Năm 1984, thí nghiệm chứng tỏ rằng các chuyển mức quang học của nguyên tử caesium không thể xảy ra nếu Xem 205 thông qua tương tác điện từ nhưng lại được phép xảy ra nếu ta tính đến tương tác yếu. Nhiều khoa học gia đã cải thiện các kết quả này và đã có thể khẳng định các tính toán dựa trên tính chất của tương tác yếu, bao gồm nhược tích của hạt nhân, với sai số vài Xem 206 phần trăm.

Tương tác yếu còn cho phép ta phân biệt trái với phải. Thiên nhiên có những quá trình khác với phiên bản đối xứng gương của chúng. Tóm lại, vật lý hạt đã chứng tỏ rằng



HÌNH 145 Wu Chien-Shiung (1912 –1997) đang tiến hành thí nghiệm về sự vi phạm tính chẵn lẻ.

thiên nhiên thuận tay trái (một cách yếu ớt).

Tính thuận tay trái của thiên nhiên đã được hiểu theo nghĩa đen. Mọi thí nghiệm đều khẳng định hai phát biểu quan trọng về tương tác yếu mà ta có thể đoán ra được từ Hình 144. Câu đố 134 e

▷ Tương tác yếu chỉ kết nối các hạt quay trái với các phản hạt quay phải. Tính chẵn lẻ *bị vi phạm nặng nề* trong tương tác yếu.

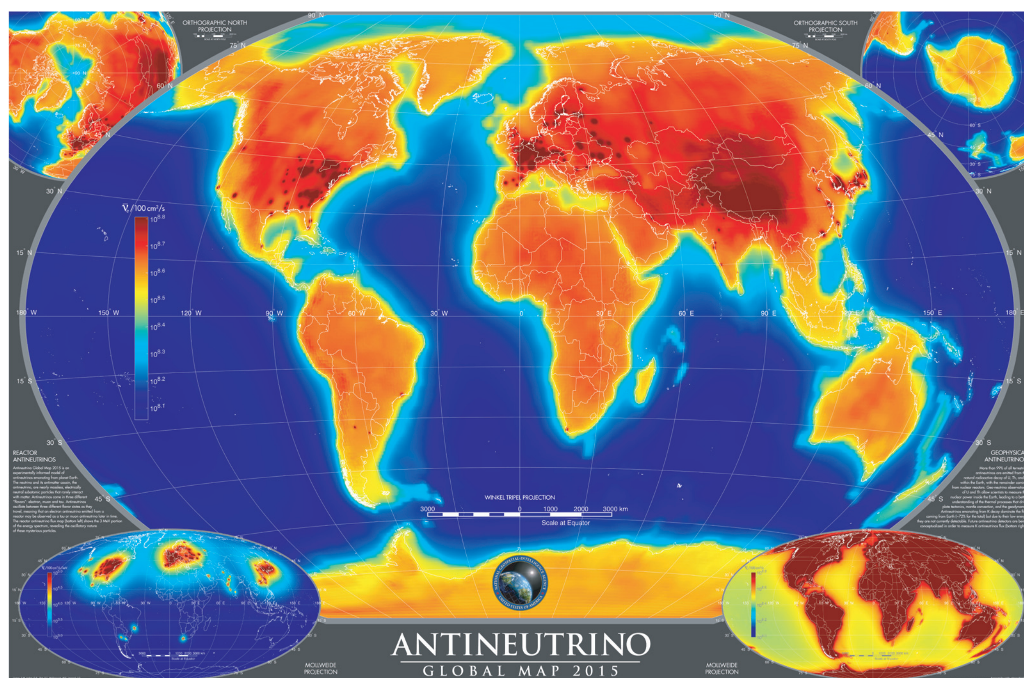
▷ Mọi neutrino mà ta quan sát được cho tới nay đều quay trái và tất cả antineutrino đều quay phải.

Kết quả này chỉ đúng nếu khối lượng neutrino bằng 0 hay rất nhỏ. Hai kết quả thực nghiệm này đã hiệu chỉnh nhiều tính chất của Lagrangian của tương tác yếu.

Phân biệt hạt và phản hạt, sự vi phạm CP

Trong tương tác yếu, việc không quan sát thấy hạt quay phải và phản hạt quay trái đã tạo ra một hệ quả quan trọng: sự vi phạm tính chẵn lẻ liên hợp điện tích C. Câu đố 135 e Việc quan sát thấy muon biến thành electron chứng minh cho điều này rõ ràng nhất: phân rã antimuon khác với phân rã muon. Tương tác yếu phân biệt các hạt với các phản hạt.

▷ Thực nghiệm chứng tỏ rằng tính chẵn lẻ C giống như tính chẵn lẻ P, *bị vi phạm nặng nề* trong tương tác yếu.



HÌNH 146 Bản đồ phân bố cường độ của $3(2)\cdot10^{25}$ antineutrino năng lượng trong khoảng 0 và 11 MeV bức xạ khỏi Trái đất trong mỗi giây. Có khoảng 99 % thông lượng hạt là từ các nguồn thiên nhiên, 1 % từ các nhà máy xử lý hạt nhân (dân sự hay quân sự) và các lò phản ứng. Bản đồ này lấy từ trang www.nga.mil, nên ta không thể tin tưởng hoàn toàn về các thông tin thuộc về con người.

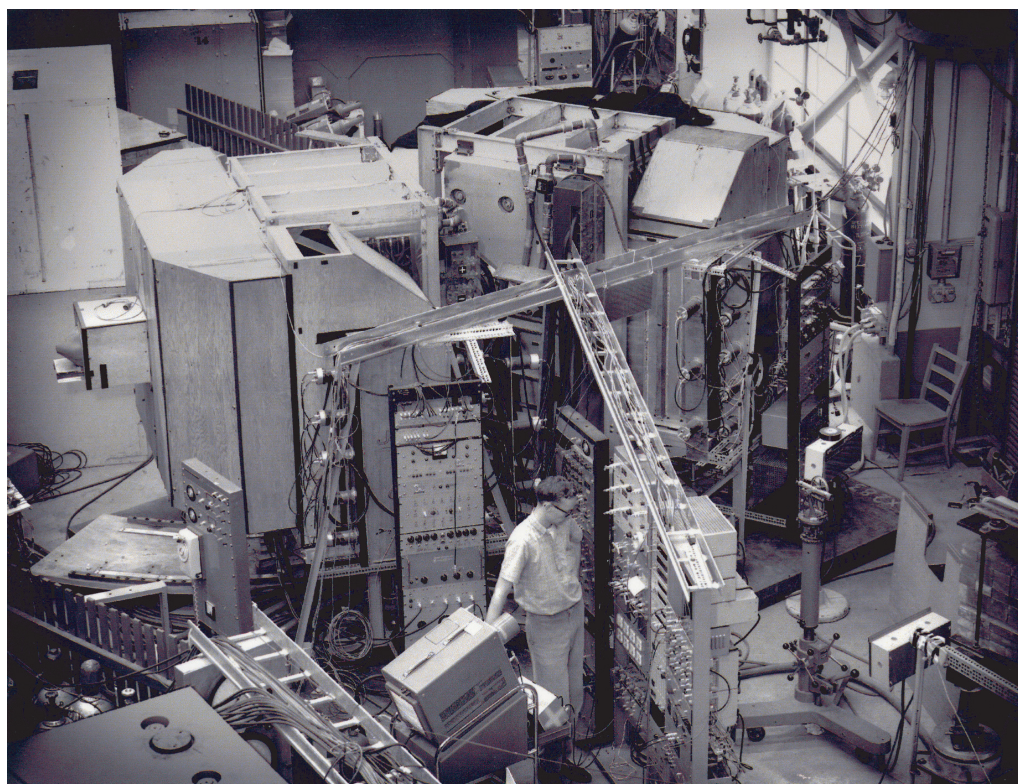
Hiệu ứng này cũng đã được chứng thực qua tất cả các thí nghiệm về tương tác yếu đã được tiến hành. Nhưng chưa hết. Năm 1964, Val Fitch và James Cronin đã tiến hành một thí nghiệm, mà hiện nay rất nổi tiếng, về sự phân rã của meson K trung hoà.

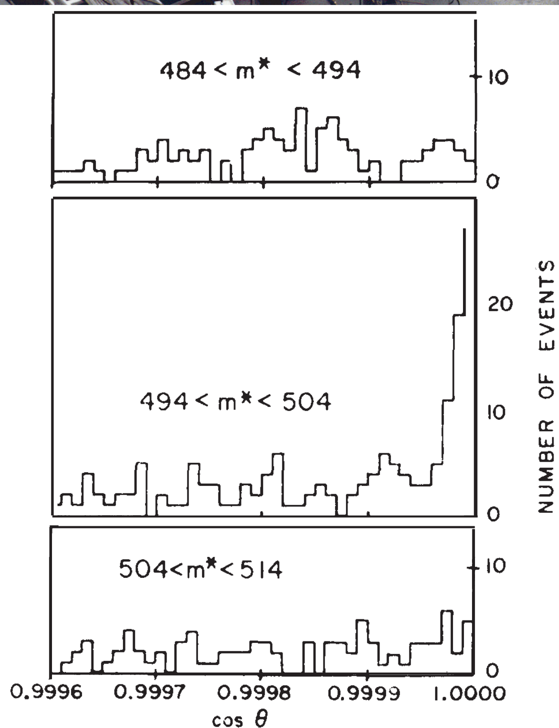
▷ Tương tác yếu cũng vi phạm tổ hợp của nghịch đảo tính chẵn lẻ với đối xứng hạt-phản hạt, tức bất biến CP. Khác với sự vi phạm P và C, xảy ra nhiều nhất, sự vi phạm CP là một hiệu ứng rất nhỏ.

Thí nghiệm mà ta thấy trong Hình 147 đã đem lại cho họ giải Nobel năm 1980. Sự vi phạm CP cũng được thấy trong meson B trung hoà, trong nhiều quá trình và phản ứng khác nhau. Việc tìm kiếm các biểu hiện của vi phạm CP, như moment lưỡng cực điện của các hạt sơ cấp khác 0, là một lĩnh vực nghiên cứu khá sôi nổi. Điều này không đơn giản vì vi phạm CP là một hiệu ứng nhỏ trong một tương tác đã rất yếu nên nó sẽ dẫn tới các thí nghiệm lớn và đắt tiền.

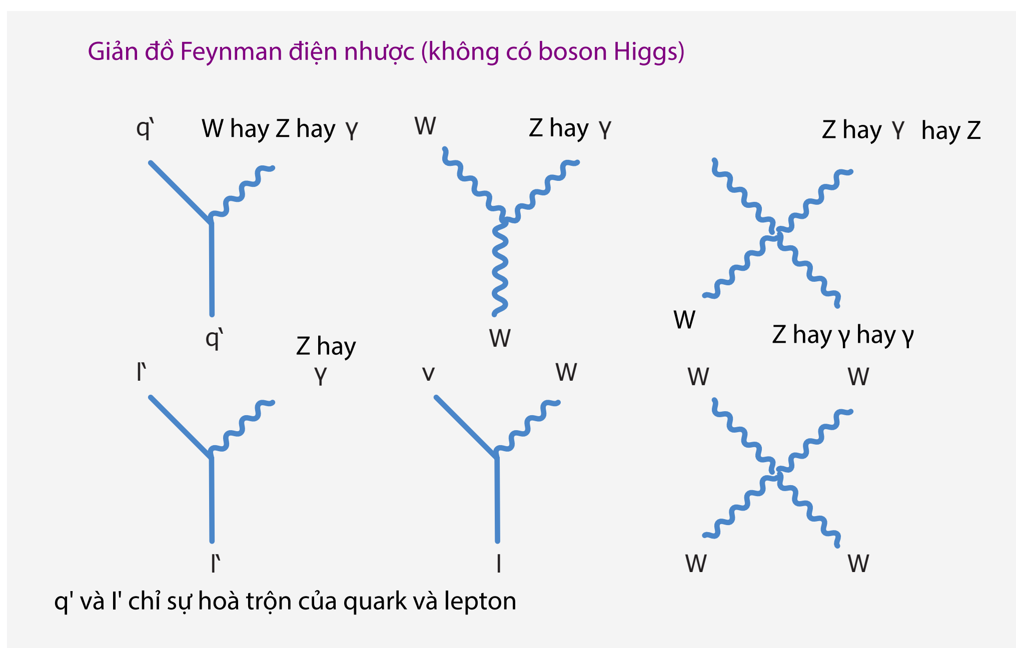
Vì tương tác yếu vi phạm bất biến CP, nó cũng vi phạm bất biến đảo chiều chuyển động (hay thời gian) T.

▷ Nhưng giống như mọi lý thuyết chuẩn, tương tác yếu không vi phạm tổ hợp đối xứng CPT: nó là một bất biến CPT.





HÌNH 147 Hình trên: thiết bị dùng để tiến hành thí nghiệm về tính chất phân rã của meson K trung hoà. Hình dưới: sự phụ thuộc vào góc đã đo; đường biểu diễn ở giữa cho ta thấy một đỉnh ở bên phải xuất hiện vì đối xứng CP bị vi phạm (© Brookhaven National Laboratory, Nobel Foundation).



HÌNH 148 Bản chất của Lagrangian tương tác điện nhược.

Nếu CPT bị vi phạm, khối lượng, thời gian sống và moment từ của hạt và phản hạt sẽ khác nhau. Người ta chưa thấy điều này.

Nhược tích và sự hoà trộn

Mọi quá trình tương tác yếu đều có thể được mô tả bằng giản đồ Feynman của Hình 148. Nhưng cũng cần có một vài lưu ý. Đầu tiên, W và Z chỉ tác dụng lên fermion quay trái và anti-fermion quay phải. Thứ 2, tương tác yếu bảo toàn *nhược tích* T_3, còn gọi là *spin đồng vị yếu*. Ba quark u, c và t, cũng như 3 neutrino, đều có spin đồng vị yếu là $T_3 = 1/2$; ba quark khác cùng các lepton có mang điện có spin đồng vị yếu là $T_3 = -1/2$. Trong một thế giới đối xứng SU(2) lý tưởng hoá, 3 boson vector W^+, W^0, W^- sẽ có spin đồng vị yếu là $1, 0$ và -1, khối lượng = 0. Tuy vậy, có một vài điểm làm cho vấn đề trở nên phức tạp.

Đầu tiên, các quark xuất hiện trong Hình 148 không phải là các quark trong tương tác mạnh: có một sự khác biệt nhỏ bắt nguồn từ *sự hoà trộn quark*. Thứ 2, cũng có *sự hoà trộn neutrino*. Và thứ 3, boson vector có khối lượng và phá vỡ đối xứng SU(2) của thế giới lý tưởng hoá; nhóm Lie SU(2) không đúng là một nhóm đối xứng của tương tác yếu và boson Higgs có khối lượng. Ta hãy lần lượt tìm hiểu vấn đề này.

Điều ngạc nhiên là trạng thái riêng trong tương tác yếu của các quark không giống như trạng thái riêng của khối lượng. Khám phá này, của Nicola Cabibbo, được mô tả bằng matrix hoà trộn Cabibbo–Kobayashi–Maskawa hay matrix CKM. Matrix này được

xác định bởi hệ thức

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = (V_{ij}) \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} . \qquad (91)$$

trong đó, theo quy ước, trạng thái của các quark +2/3 (u, c, t) không bị hoà trộn. Theo cách tham số hoá chuẩn, matrix CKM được viết là

$$V = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{13}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \qquad (92)$$

trong đó $c_{ij} = \cos\theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin\theta_{ij}$ và i, j đánh số các thế hệ $(1 \leqslant i, j \leqslant 3)$. Trong giới hạn $\theta_{23} = \theta_{13} = 0$, tức là khi chỉ có 2 thế hệ hoà trộn, tham số duy nhất còn lại là góc θ_{12}, được gọi là *góc Cabibbo*, được đưa ra chỉ khi ta đã biết 2 thế hệ đầu của fermion. Phase δ_{13}, nằm giữa 0 và 2π, khác 0 trong thiên nhiên, và biểu thị một tính chất là bất biến CP bị vi phạm trong trường hợp tương tác yếu. Nó xuất hiện trong cột thứ 3 và cho ta thấy rằng vi phạm CP có liên hệ với sự hiện hữu của (ít nhất) 3 thế hệ.

Phase δ_{13} của vi phạm CP thường được biểu diễn bằng *bất biến Jarlskog*, được định nghĩa là $J = \sin\theta_{12} \sin\theta_{13} \sin\theta_{23}^2 \cos\theta_{12} \cos\theta_{13} \cos\theta_{23} \sin\delta_{13}$. Biểu thức này độc lập với định nghĩa của góc phase; nó được Cecilia Jarlskog, một nhà vật lý hạt nổi tiếng, người
Xem 207 Thuỵ Điển, khám phá. Giá trị đo được của nó là $J = 2.96(20) \cdot 10^{-5}$.

Matrix hoà trộn CKM được tiên đoán là có tính đơn nguyên. Tính chất này đã được
Xem 186 nhiều thí nghiệm chứng minh. Các giới hạn trên và dưới chính xác tới 90 % đối với *độ lớn* của matrix phức CKM V là

$$|V| = \begin{pmatrix} 0.97428(15) & 0.2253(7) & 0.00347(16) \\ 0.2252(7) & 0.97345(16) & 0.0410(11) \\ 0.00862(26) & 0.0403(11) & 0.999152(45) \end{pmatrix} . \qquad (93)$$

Các giá trị này đã được xác định trong vô vàn thí nghiệm do hàng ngàn vật lý gia thực hiện.

Các neutrino cũng hoà trộn, theo cùng một cách như các quark d, s và b. Sự xác định các phần tử của matrix không phức tạp như trường hợp quark. Đây là một lĩnh vực được nhiều người nghiên cứu. Giống như quark và neutrino, các trạng thái riêng của khối lượng và các trạng thái riêng của vị có khác nhau. Có 1 matrix hoà trộn dành riêng cho neutrino, được gọi là *matrix hoà trộn Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata* hay *matrix hoà trộn PMNS*,với 4 góc dành cho các neutrino có khối lượng (nó sẽ có 6 góc nếu neutrino không có khối lượng). Năm 2012, các trị của matrix đo được là

$$P = \begin{pmatrix} 0.82 & 0.55 & -0.15 + 0.038i \\ -0.36 + 0.020i & 0.70 + 0.013i & 0.61 \\ 0.44 + 0.026i & -0.45 + 0.017i & 0.77 \end{pmatrix} . \qquad (94)$$

Nhiều thí nghiệm đang tiến hành để đo các tham số này với độ chính xác cao hơn.

Sự phá vỡ đối xứng – và sự không thống nhất của tương tác điện từ và tương tác yếu

Các boson trung gian W và Z có khối lượng khác nhau. Như vậy tương tác yếu không có tính đối xứng SU(2). Ngoài ra, các quá trình điện từ và yếu *hoà trộn với nhau*.

Những công trình nghiên cứu công phu trong thập niên 1960 chứng tỏ rằng sự hoà trộn của tương tác điện từ và tương tác yếu có thể mô tả bằng một *hằng số liên kết 'điện nhược'* g và một *góc hoà trộn yếu* θ_W. Góc hoà trộn mô tả cường độ của sự phá vỡ đối xứng SU(2).

Xem 186

Ta cần nhấn mạnh rằng, khác với những điều được nói và viết, tương tác yếu và tương tác điện từ *không* thống nhất với nhau. Chúng *không bao giờ* thống nhất. Dù thuật ngữ 'sự thống nhất điện nhược' được sử dụng liên tục trong nhiều thập niên qua, đó vẫn là một thuật ngữ *sai*. Tương tác điện từ và tương tác yếu là 2 tương tác độc lập, với 2 hằng số liên kết, *hoà trộn với nhau*. Nhưng chúng không thống nhất. Mặc dù hội đồng xét duyệt giải Nobel sử dụng thuật ngữ 'sự thống nhất', những người nhận giải vẫn khẳng định rằng thuật ngữ đó *không đúng*.

▷ Tương tác điện từ và tương tác yếu *không* thống nhất. Người ta đã diễn giải sự hoà trộn của chúng.

Hằng số liên kết điện từ thông thường e liên hệ với hằng số liên kết 'điện nhược' g và góc hoà trộn θ_w bởi hệ thức

$$e = g \sin\theta_w \ , \tag{95}$$

ở mức chuyển động lượng 4 chiều thấp, đó là hằng số cấu trúc tinh tế với trị số 1/137.036. Hằng số liên kết điện nhược g cũng xác định *hằng số Fermi* G_F, theo công thức

$$G_F = \frac{g^2\sqrt{2}}{8M_W^2} \ . \tag{96}$$

Đối xứng SU(2) bị phá vỡ hàm ý là trong thế giới *thật*, khác với thế giới SU(2) *lý tưởng*, các boson vector trung gian là

— photon không khối lượng, trung hoà, được cho bởi công thức $A = B\cos\theta_W + W^3\sin\theta_W$;
— boson Z có khối lượng, trung hoà, được cho bởi công thức $Z = -B\sin\theta_W + W^3\cos\theta_W$;
— boson W có khối lượng và điện tích, được cho bởi công thức $W^{\pm} = (W^1 \mp iW^2)/\sqrt{2}$.

Sự hoà trộn của tương tác điện từ và tương tác yếu cũng như sự phá vỡ đối xứng SU(2) hàm ý rằng hằng số liên kết điện từ e, hằng số liên kết yếu g và khối lượng boson trung gian có một liên hệ đầy ấn tượng

$$\left(\frac{m_W}{m_Z}\right)^2 + \left(\frac{e}{g}\right)^2 = 1 \ . \tag{97}$$

Hệ thức này đã được kiểm chứng qua thực nghiệm.

Xem 208

Sự hoà trộn của tương tác điện từ và tương tác yếu cũng đưa tới giả thuyết về sự hiện hữu của một *boson Higgs* sơ cấp, vô hướng. Tiên đoán này, từ năm 1963, đã được Peter Higgs và nhiều nhà vật lý hạt khác để xuất, dựa theo ý tưởng mà Yoichiro Nambu và chủ yếu là Philip Anderson đã giới thiệu trong vật lý thể rắn. Boson Higgs duy trì tính đơn nguyên của sự tán xạ boson dọc ở mức năng lượng vài TeV và ảnh hưởng đến khối lượng của mọi hạt sơ cấp khác. Sau cùng, vào năm 2012, người ta đã quan sát được boson Higgs trong 2 thí nghiệm lớn ở CERN.

Lagrangian của tương tác yếu và tương tác điện từ

Nếu chúng ta kết hợp các tính chất của tương tác yếu đã đề cập ở trên, cụ thể là giản đồ Feynman của nó, khả năng biến đổi hạt của nó, sự vi phạm P và C, sự hoà trộn quark, sự hoà trộn neutrino và sự phá vỡ tính đối xứng, ta sẽ đi đến công thức mật độ Lagrange đầy đủ nhất. Công thức đó là:

$$
\begin{aligned}
\mathcal{L}_{\text{E\&W}} = \; & \textstyle\sum_k \overline{\psi}_k (i\partial\!\!\!/ - m_k - \frac{g m_k H}{2 m_W}) \psi_k && \Big\} \text{ 1. số hạng khối lượng fermion} \\
& -e \textstyle\sum_k q_k \overline{\psi}_k \gamma^\mu \psi_k A_\mu && \Big\} \text{ 2. tương tác điện từ} \\
& -\tfrac{g}{2\sqrt{2}} \textstyle\sum_k \overline{\psi}_k \gamma^\mu (1-\gamma^5)(T^+ W^+_\mu + T^- W^-_\mu)\psi_k && \Big\} \text{ 3. dòng yếu có điện tích} \\
& -\tfrac{g}{2\cos\theta_W} \textstyle\sum_k \overline{\psi}_k \gamma^\mu (g^k_V - g^k_A \gamma^5)\psi_k Z_\mu && \Big\} \text{ 4. dòng yếu trung hoà} \\
& -\tfrac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} && \Big\} \text{ 5. điện từ trường} \\
& -\tfrac{1}{2} W^+_{\mu\nu} W^{-\mu\nu} - \tfrac{1}{4} Z_{\mu\nu} Z^{\mu\nu} && \Big\} \text{ 6. trường W và Z yếu} \\
& +m^2_W W^+ W^- + \tfrac{1}{2} m^2_Z Z^2 && \Big\} \text{ 7. số hạng khối lượng của W và Z} \\
& -gWWA - gWWZ && \Big\} \text{ 8. tương tác bậc 3} \\
& -\tfrac{g^2}{4}(W^4 + Z^4 + W^2 F^2 + Z^2 F^2) && \Big\} \text{ 9. tương tác bậc 4} \\
& +\tfrac{1}{2}(\partial^\mu H)(\partial_\mu H) - \tfrac{1}{2} m^2_H H^2 && \Big\} \text{ 10. khối lượng boson Higgs} \\
& -\tfrac{g m^2_H}{4 m_W} H^3 - \tfrac{g^2 m^2_H}{32 m^2_W} H^4 && \Big\} \text{ 11. Sự tự tương tác Higgs} \\
& +(g m_W H + \tfrac{g^2}{4} H^2)(W^+_\mu W^{-\mu} + \tfrac{1}{2\cos^2\theta_w} Z_\mu Z^\mu) && \Big\} \text{ 12. tương tác Higgs–W và Z.}
\end{aligned}
\qquad (98)
$$

Các số hạng trong Lagrangian có liên kết với giản đồ Feynman của Hình 148:

1. số hạng này mô tả quán tính của mọi vật quanh ta, tạo nên chuyển động của fermion, biểu diễn cho động năng của quark và lepton, vì nó xuất hiện trong phương trình Dirac thông thường, được hiệu chỉnh bằng *liên kết Yukawa* đối với trường Higgs H và có thể bởi số hạng Majorana đối với neutrino (không xuất hiện ở đây);
2. số hạng thứ 2 mô tả tương tác quen thuộc giữa vật chất và bức xạ điện từ, giải thích gần như mọi tính chất và màu sắc của vật chất mà ta gặp trong đời sống hằng ngày;
3. số hạng này được gọi là *tương tác dòng điện yếu*, bắt nguồn từ sự trao đổi các boson W ảo, nguyên nhân gây ra phân rã β và là nguyên nhân làm cho Mặt trời chiếu sáng;
4. số hạng này là *tương tác dòng yếu trung hoà*, 'lý thuyết $V - A$' của George Sudarshan, giải thích cho sự tán xạ đàn hồi của neutrino trong vật chất;
5. số hạng này biểu diễn động năng của photon, tạo nên sự tiến hoá của trường điện từ

trong chân không và các phương trình Maxwell cơ bản;
6. số hạng này biểu diễn động năng của trường bức xạ yếu, tạo nên sự tiến hoá của các boson W và Z trung gian trong tương tác yếu;
7. số hạng này là động năng của các boson vector;
8. số hạng này biểu diễn đỉnh bội 3 của sự tự tương tác của boson vector;
9. số hạng này biểu diễn đỉnh bội 4 của sự tự tương tác của boson vector;
10. số hạng này là động năng của boson Higgs;
11. số hạng này là sự tự tương tác boson Higgs;
12. số hạng sau cùng này được xem là biểu diễn cho sự tương tác boson vector với boson Higgs để phục hồi tính đơn nguyên ở mức năng lượng cao.

Chúng ta hãy xem xét các chi tiết quan trọng. Các đại lượng xuất hiện trong Lagrangian là:

— Các hàm sóng $\psi_k = (\nu'_k \; l^-_k)$ đối với lepton và $(u_k \; d'_k)$ đối với quark là các trường fermion quay trái của thế hệ fermion thứ k; mỗi thành phần là một spinor. Chỉ số $k = 1, 2, 3$ là số thế hệ: giá trị 1 tương ứng với (u d $\nu_e e^-$), thế hệ 2 là (c s $\nu_\mu \mu^-$) và 3 là (t b $\nu_\tau \tau^-$). ψ_k biến đổi như các bộ đôi dưới phép biến đổi SU(2); các trường ‘quay phải’ là các bộ đơn SU(2).

Trong các bộ đôi, ta có

$$d'_k = \sum_l V_{kl} d_l \; , \tag{99}$$

trong đó V_{kl} là matrix hoà trộn Cabibbo–Kobayashi–Maskawa, d'_k là các trạng thái riêng vị của quark và d_k là các trạng thái riêng khối lượng của quark. Một biểu thức tương tự dành cho sự hoà trộn của neutrino là:

$$\nu'_k = \sum_l P_{kl} \nu_l \; , \tag{100}$$

trong đó P_{kl} là matrix hoà trộn Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata, ν'_l là các trạng thái riêng vị của neutrino và ν_l là các trạng thái riêng khối lượng của neutrino.
— Đối với bức xạ, A^μ và $F^{\mu\nu}$ là các trường của boson vector không khối lượng của trường điện từ, *photon* γ.

$W^\pm_\mu$ là boson vector chuẩn có điện tích và khối lượng của tương tác yếu; các hạt tương ứng, W^+ và W^-, là phản hạt của nhau.

Z_μ là trường của boson vector chuẩn trung hoà có khối lượng của tương tác yếu; boson vector trung hoà thường được gọi là Z^0.
— H là trường của boson Higgs vô hướng trung hoà H^0, hạt sơ cấp vô hướng duy nhất trong mô hình chuẩn.
— Hai tích, mỗi tích dành cho một tương tác. Số q_k là *điện tích* quen thuộc của hạt ψ_k theo đơn vị điện tích positron. Số $t_{3L}(k)$ là *spin đồng vị yếu*, hay *nhược tích*, của fermion k, có giá trị $+1/2$ đối với u_k, ν_k và $-1/2$ đối với d_k, l_k. Hai tích này xác định *liên kết vector*

$$g^k_V = t_{3L}(k) - 2q_k \sin^2\theta_W \tag{101}$$

và liên kết theo trục

$$g_A^k = t_{3L}(k) . \tag{102}$$

Tổ hợp $g_V^k - g_A^k$, hay gọn hơn $V - A$, biểu diễn cho độ vi phạm tối đa tính chẵn lẻ P và C trong tương tác yếu.

— Các toán tử T^+ và T^- là các toán tử tăng và giảm nhược tích. Tác dụng của chúng lên một trường được cho bởi $T^+ l_k^- = \nu_k$ và $T^- u_k = d_k$.

Ta thấy rằng Lagrangian thực sự chứa mọi ý tưởng đã khai triển ở trên. Lagrangian điện nhược về cơ bản là *duy nhất*: nó không thể có một dạng toán học khác vì cả 2 thuật ngữ điện từ và yếu đều được hiệu chỉnh theo các yêu cầu của bất biến Lorentz U(1), bất biến chuẩn bị-phá-vỡ SU(2), đối xứng hoán vị và tính tái chuẩn hoá được.

Lagrangian của tương tác yếu đã được kiểm tra và kiểm chứng bằng hàng ngàn thí nghiệm. Nhiều thí nghiệm đã được thiết kế một cách đặc biệt để đạt tới độ chính xác
Xem 186
cao nhất. Trong mọi trường hợp đều không có mâu thuẫn giữa thực nghiệm và lý thuyết. Mặc dù 3 số hạng cuối của Lagrangian chưa được khẳng định hoàn toàn nhưng đây có lẽ là Lagrangian chính xác nhất của tương tác yếu.

Những điều kỳ lạ về tương tác yếu

Tương tác yếu, cùng với sự vi phạm tính chẵn lẻ và các neutrino khó nắm bắt của nó,
Xem 209
đã gây ra một sự mê hoặc bí ẩn trên tất cả những người đã tìm hiểu nó. Chúng ta hãy nghiên cứu sự mê hoặc này thêm một chút nữa.

* *

Tương tác yếu đòi hỏi vật chất phải nhiều hơn phản vật chất. Nếu không có sự vi phạm tính chẵn lẻ thì sẽ không có một chút vật chất nào trong vũ trụ vì tất cả vật chất và phản vật chất xuất hiện trong big bang sẽ huỷ biến hết. Tương tác yếu ngăn sự đối xứng giữa vật chất và phản vật chất để trong vũ trụ có chất này nhiều hơn chất kia. Tóm lại, sự vi phạm tính chẵn lẻ của tương tác yếu là điều kiện cần cho sự hiện hữu của chúng ta.

* *

Tương tác yếu cũng là nguyên nhân sinh ra nhiệt trong Trái đất. Nhiệt lượng này giữ cho magma ở trạng thái lỏng. Kết quả là dù yếu nhưng tương tác yếu lại là nguyên nhân của động đất, sóng thần và núi lửa.

* *

Lagrangian của tương tác yếu đã được Steven Weinberg, Sheldon Glashow và Abdus Salam minh giải. Họ đã nhận giải Nobel vật lý năm 1979 cho công trình này.

Abdus Salam (b. 1926 Santokdas, d. 1996 Oxford) là một thiên tài vật lý, khoa học gia vĩ đại người Pakistan, một tấm gương cho các khoa học gia trên thế giới, người Hồi giáo đầu tiên đoạt giải Nobel và là một người thông tuệ. Trong diễn từ Nobel ông đã phát biểu: 'Trong thực tế, đây là niềm tin của mọi nhà vật lý: chúng ta càng tìm kiếm thì chúng ta càng thấy kinh ngạc, nhãn quan của ta càng bị chói loà.' Salam thường kết nối sự nghiên cứu của mình với tinh thần của Hồi giáo. Có một lần khi được phỏng vấn trên đài truyền hình Pakistan về lý do tại sao ông tin vào sự thống nhất của Vật lý, ông đã trả lời: 'Vì Thượng đế là duy nhất!' Khi quốc hội Pakistan, trong một phán quyết bất

công của thế kỷ 20, đã tuyên bố rằng những người Hồi giáo Ahmadi không phải là tín đồ Hồi giáo và mở màn cho một cuộc bách hại tôn giáo, Salam đã rời Pakistan và không bao giờ quay lại. Sự bách hại này vẫn tiếp diễn cho tới ngày nay: trên mộ bia của ông ở Pakistan, từ 'muslim' đã bị đục bỏ và trên internet đầy những bình luận công kích ông, ngay cả trên Wikipedia. Salam cũng là một nhà quản lý khoa học nổi tiếng. Với sự bảo trợ của UNESCO, Salam đã sáng lập Trung tâm vật lý lý thuyết quốc tế và Viện hàn lâm khoa học của thế giới thứ 3, đều ở Trieste, Ý, thu hút được nhiều khoa học gia lỗi lạc của các quốc gia đang phát triển.

* *

Phân rã β, bắt nguồn từ tương tác yếu, tách rời electron và proton. Sau cùng vào năm 2005, người ta đã đề nghị ứng dụng hiệu ứng này để tạo ra pin sử dụng lâu dài gắn trên vệ tinh. Tương lai sẽ cho ta biết đề nghị này có thành sự thật hay không.

* *

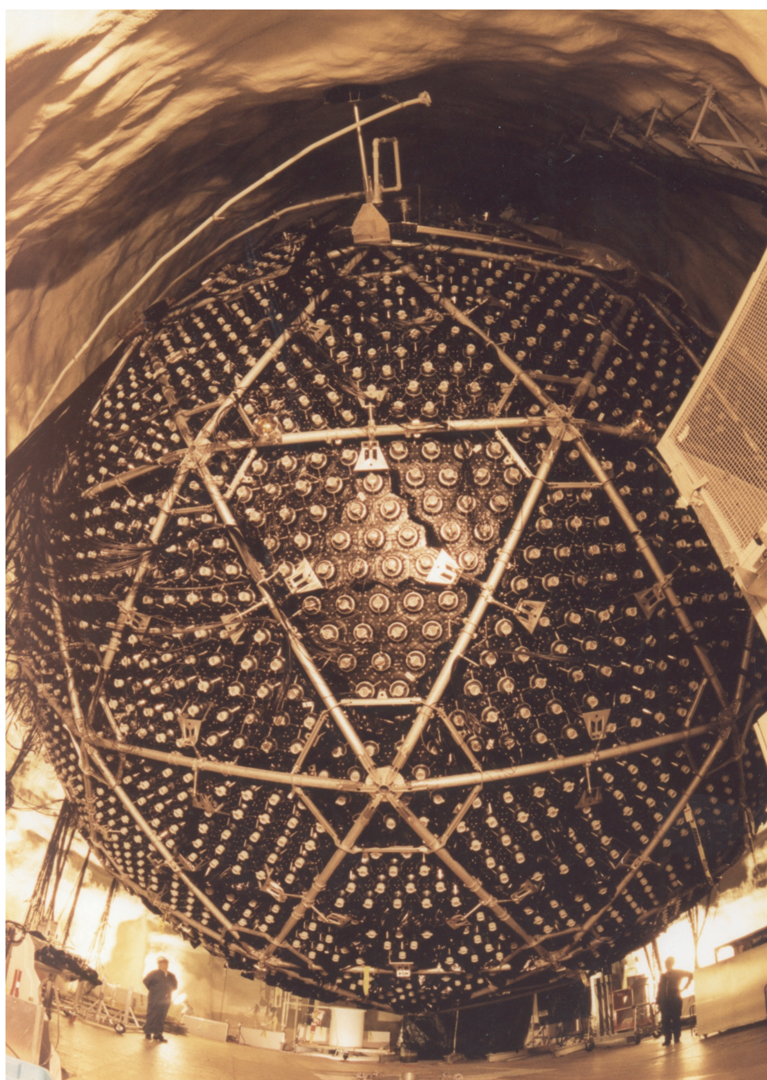
Xem 211
Mỗi giây có khoảng 10^{16} neutrino xuyên qua cơ thể chúng ta. Chúng từ 5 nguồn sau:

— *Neutrino Mặt trời* đến mặt đất với thông lượng $6 \cdot 10^{14}$ /m^{2}s, năng lượng trong khoảng từ 0 tới 0.42 MeV; chúng bắt nguồn từ phản ứng p-p trong Mặt trời; một phần rất nhỏ bắt nguồn từ phản ứng ^{8}B có năng lượng lên tới 15 MeV.
— *Neutrino khí quyển* là sản phẩm của tia vũ trụ khi va chạm với không khí, gồm 2/3 neutrino muon và 1/3 neutrino electron, năng lượng trong khoảng từ 100 MeV tới 5 GeV.
Trang 185
— *Neutrino Trái đất* từ sự phóng xạ đã giữ cho Trái đất dưới dạng nóng ấm với thông lượng $6 \cdot 10^{10}$ /m^{2}s.
— *Neutrino hoá thạch* từ big bang, nhiệt độ 1.95 K được tìm thấy trong vũ trụ với mật độ 300 cm^{-3}, tương ứng với thông lượng 10^{15} /m^{2}s.
— *Neutrino nhân tạo* được sinh ra trong các lò phản ứng hạt nhân (năng lượng 4 MeV) dưới dạng các chùm neutrino trong các máy gia tốc, sử dụng sự phân rã của pion và kaon. Một nhà máy điện hạt nhân tiêu chuẩn sẽ sinh ra $5 \cdot 10^{20}$ neutrino/s. Các chùm Neutrino được tạo ra, thí dụ như ở CERN, Geneva. Chúng thường xuyên được gởi đi, xuyên qua 700 km đến phòng thí nghiệm Gran Sasso ở trung tâm nước Ý, nơi người ta sẽ phát hiện ra chúng. (Năm 2011, một sai số đo bất ngờ đã làm cho nhiều người tin (một cách sai lầm) rằng các neutrino này đi nhanh hơn ánh sáng.)

  Neutrino chủ yếu được tia vũ trụ tạo ra trong khí quyển nhưng cũng đến trực tiếp từ bức xạ nền và từ tâm Mặt Trời. Tuy vậy, trong một đời người – khoảng 3 tỷ s – ta chỉ có 10 % cơ hội một trong các neutrino này tương tác với một trong $3 \cdot 10^{27}$ nguyên tử của cơ thể chúng ta. Lý do là thông thường thì tương tác yếu chỉ tác dụng trong khoảng cách < 10^{-17} m, tức 1/100 đường kính của proton. Tương tác yếu thực sự yếu.

* *

Trong năm 1957, nhà vật lý vĩ đại Bruno Pontecorvo đã tưởng tượng ra là các neutrino đang du hành có thể tự phát biến đổi thành phản hạt của chính nó. Ngày nay, qua thực nghiệm người ta biết rằng các neutrino đang du hành có thể thay đổi thế hệ và ta gọi đó là *sự dao động của neutrino*. Những thí nghiệm như vậy được tiến hành trong những hang lớn nằm sâu dưới lòng đất; thí nghiệm nổi tiếng nhất được trình bày trong Hình 149.



HÌNH 149 Một thí nghiệm điển hình dưới lòng đất để quan sát sự dao động của neutrino: Đài quan sát Neutrino Sudbury ở Canada (© Sudbury Neutrino Observatory)

Tóm lại, thí nghiệm chứng tỏ rằng tương tác yếu hoà trộn các loại neutrino theo một cách giống như nó đã hoà trộn các loại quark.

* *

Chỉ có một loại hạt (gần như) chỉ tương tác yếu: neutrino. Neutrino không có điện tích, không sắc tích và gần như không có tích hấp dẫn - khối lượng. Để có thể hình dung về sự yếu của tương tác yếu, người ta thường nói rằng xác suất của 1 neutrino bị một bức tường chì có chiều dầy 1 năm ánh sáng hấp thu < 50 %. Như vậy vũ trụ được xem như trống rỗng đối với neutrino. Có chỗ dành cho các trạng thái liên kết của neutrino quay quanh các vật không? Trạng thái liên kết như vậy lớn cỡ nào? Ta có thể tưởng tượng ra các trạng thái liên kết, được gọi là neutrinium, của các neutrino và antineutrino quay quanh nhau không? Câu trả lời phụ thuộc vào khối lượng của neutrino. Các vật không

khối lượng không có trạng thái liên kết. Chúng có thể và sẽ phân rã thành 2 hạt tự do không khối lượng.*

Vì neutrino có khối lượng, về nguyên tắc có thể có một trạng thái liên kết neutrino–antineutrino. Nó lớn cỡ nào? Nó có các trạng thái kích thích không? Có thể phát hiện ra chúng không? Vấn đề này chưa được giải quyết. Câu đố 136 ny

Tương tác yếu yếu đến nỗi sự huỷ biến neutrino–antineutrino – chỉ có thể tạo ra 1 boson trung gian Z– cho tới nay vẫn chưa ai quan sát thấy.

* *

Việc tìm hiểu sự hoà trộn của tương tác yếu và tương tác điện từ dẫn đến việc tiên đoán về *boson Higgs*. Sự hấp dẫn của boson Higgs được nhấn mạnh bằng sự kiện nó là hạt duy nhất mang tên một vật lý gia. Cũng cần nói thêm bài báo của Peter Higgs về boson mang tên ông chỉ có 79 hàng cùng với 5 phương trình. Xem 210

* *

Trong những năm 1993 và 1994 một cuộc vận động gây quỹ ồn ào trên khắp nước Mỹ do nhiều nhà vật lý hạt tiến hành. Họ tìm kiếm ngân sách cho 'máy siêu va chạm siêu dẫn', một máy gia tốc hạt có chu vi 80 km. Đây sẽ là một máy lớn nhất mà con người đã từng xây dựng, với một chi phí ước tính hơn 12 tỷ dollars, để tìm ra boson Higgs trước châu Âu với một chi phí ít hơn. Lý luận chính được nêu ra là: vì boson Higgs là nền tảng của khối lượng hạt nên điều quan trọng là khoa học gia Mỹ phải biết về nó trước. Ngoài kết luận không xác đáng, điều tệ nhất ở đây là tiền đề sai.

Trang 233 Ta đã thấy ở trên là 99 % khối lượng của proton, tức là của vũ trụ, bắt nguồn từ sự giam giữ của quark; phần khối lượng này hiện hữu ngay cả trong trường hợp quark có khối lượng không đáng kể. Boson Higgs *không phải* là nguồn gốc của khối lượng; nó chỉ làm sáng tỏ một phần vấn đề này. Đặc biệt, boson Higgs không thể cho ta khả năng tính toán hay tìm hiểu về khối lượng của bất kỳ một hạt nào. Toàn bộ cuộc vận động là một trường hợp đánh lạc hướng cũ kỹ và những người tham gia đã tỏ ra thiếu trung thực.** Cuối cùng, dự án bị đình chỉ chủ yếu vì lý do tài chính. Xem 195

> “Difficile est saturam non scribere.***”
>
> Juvenal, *Saturae* 1, 30.

* *

Không có một cái tên được mọi người chấp nhận dành cho Thuyết trường lượng tử của tương tác yếu. Tên *Nhược động lực học lượng tử* (QAD) – từ tiếng Hy Lạp có nghĩa là 'yếu' – chưa được công nhận.

---

* Đặc biệt, điều này đúng đối với photon liên kết bằng lực hấp dẫn; không có trạng thái như vậy.

** Chúng tôi không phải là những người đạo đức giả. Sự dối trá về máy siêu va chạm có thể bỏ qua khi so sánh với các điều dối trá khác. Sự dối trá lớn nhất thế giới có lẽ nằm ở chỗ người ta tuyên bố rằng để bảo đảm sự sống còn, chính phủ Mỹ cần tăng thêm ngân sách cho quân đội nhiều hơn tất cả các quốc gia khác cộng lại. Sự dối trá này, chỉ trong một năm, lớn hơn dối trá siêu gia tốc 40 lần. Nhiều chính phủ khác đổ một tỷ lệ tổng sản lượng quốc gia lớn hơn cho sự dối trá này (theo kiểu của họ). Kết quả sự tiêu tốn cho quốc phòng là nguyên nhân trực tiếp của sự nghèo đói ở những quốc gia có sự dối trá đó.

*** 'Không nhạo báng là một điều rất khó.'

* *

Xem 212

Con bò khi nhai lại thì số lần chuyển động quai hàm theo chiều kim đồng hồ và ngược lại có bằng nhau không? Năm 1927, các nhà vật lý lý thuyết Pascual Jordan và Ralph de Laer Kronig đã công bố một công trình nghiên cứu chứng tỏ rằng ở Đan Mạch thì hai số này bằng nhau. Như vậy hướng nhai lại của bò không có liên quan gì với tương tác yếu.

* *

Dĩ nhiên, tương tác yếu là nguyên nhân của phân rã β, và một phần của nền bức xạ dẫn tới sự đột biến và tiến hoá sinh học.

* *

Do thuế má đè nặng trên xã hội, các nghiên cứu về Vật lý hạt nhân, gần như biến mất trên hành tinh, giống như bệnh sốt bại liệt. Các nghiên cứu về hạt nhân chỉ còn tồn tại trong các phòng thí nghiệm được canh gác cẩn mật trên thế giới, phần lớn do các nhân vật đáng ngờ điều hành, để tạo ra các vũ khí nguy hiểm. Chỉ có một ít thí nghiệm của một vài nhà nghiên cứu là tránh khỏi trường hợp này, góp phần cho sự tiến bộ của khoa học.

* *

Xem 213

Các lĩnh vực thú vị của Vật lý hạt nhân ra đời khi người ta sử dụng các laser công suất lớn. Năm 1999, một nhóm khoa học gia Anh do Ken Ledingham đứng đầu đã quan sát được sự phân hạch của uranium bằng laser trong hạt nhân ^{238}U. Đồng thời nhóm này cũng thành công với laser cỡ nhỏ. Kỳ công sau cùng vào năm 2003 là sự biến nguyên tố ^{129}I thành ^{128}I bằng laser. Người ta làm được điều này bằng cách tập trung một xung laser 360 J vào một lá vàng; plasma sinh ra, gia tốc các electron tới tốc độ tương đối tính chạm vào lá vàng, tạo ra tia γ năng lượng cao có thể sử dụng cho việc biến đổi nguyên tố.

Tóm tắt về tương tác yếu

Tương tác yếu được mô tả bằng lý thuyết chuẩn không Abel dựa trên nhóm chuẩn SU(2) mất đối xứng đối với các quá trình yếu. Tương tác yếu hoà trộn với nhóm chuẩn U(1) của tương tác điện động lực. Sự mô tả này phù hợp với tính chất của phân rã β, của các phép biến đổi hạt, của neutrino và sự hoà trộn của chúng, của các boson trung gian W và Z, của sự vi phạm tính chẵn lẻ, của sự sinh nhiệt trong Trái đất, của nhiều phản ứng quan trọng trong Mặt trời và của nguồn gốc vật chất trong vũ trụ. Mặc dù tương tác yếu có yếu nhưng nó hiện diện khắp mọi nơi.

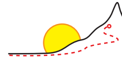
Tương tác yếu được mô tả bằng một Lagrangian. Sau 1 thế kỷ nghiên cứu nhiệt tình, người ta đã hiểu tường tận Lagrangian, bao gồm cả boson Higgs (kể từ năm 2012).

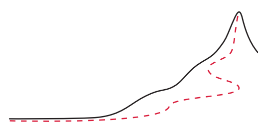
Mọi giới hạn còn lại của thuyết chuẩn về tương tác yếu chỉ thuộc về nhận thức. Giống như trong mọi Thuyết trường lượng tử, cũng là trường hợp của tương tác yếu, dạng thức toán học của Lagrangian hầu như được xác định một cách duy nhất theo yêu cầu của tính tái chuẩn hoá được, tính bất biến Lorentz và tính bất biến chuẩn (mất đối xứng) – trong trường hợp này là SU(2). Ta nói 'hầu như', như trong trường hợp tương tác mạnh,
Trang 239
vì Lagrangian của tương tác yếu và tương tác điện từ còn chứa vài tham số mà ta chưa

giải thích được:

— Hai hằng số liên kết g và g' của tương tác yếu và tương tác điện từ. (Chúng xác định góc hoà trộn yếu $\theta_w = \arctan(g'/g)$.)
— Khối lượng $M_Z = 91\,\text{GeV}/c^2$ của boson trung hoà Z.
— Con số $n = 3$ của các thế hệ.
— Khối lượng của 6 lepton và 6 quark.
— Bốn tham số của matrix hoà trộn quark Cabibbo–Kobayashi–Maskawa và 6 tham số của matrix hoà trộn neutrino, bao gồm phase vi phạm CP tương ứng.
— Tính chất của không-thời gian, đặc biệt là bất biến Lorentz, tính liên tục và số chiều của nó được giả sử ngay từ đầu một cách hiển nhiên.
— Người ta cũng chưa biết cách mà tương tác yếu hành xử trong trường hấp dẫn mạnh, cũng như trong không-thời gian cong nhiều.

Trước khi tìm hiểu cách vượt qua các giới hạn này, ta sẽ tóm tắt tất cả các kết quả đã tìm được cho tới nay trong *Mô hình chuẩn của vật lý hạt*.





Chương 9
Mô hình chuẩn của vật lý hạt – Bảng tổng hợp

Cách diễn đạt *Mô hình chuẩn của Vật lý hạt sơ cấp* có thể thay thế cho việc tóm tắt mọi kiến thức về chuyển động của các hạt lượng tử trong thiên nhiên. Người ta có thể giải thích Mô hình chuẩn trong 4 bảng: bảng các hạt sơ cấp, bảng tính chất các hạt, bảng các sơ đồ Feynman khả hữu và bảng các hằng số cơ bản.

Các bảng sau đây liệt kê các hạt sơ cấp đã biết trong thiên nhiên.

BẢNG 21 Các hạt sơ cấp.

Bức xạ	điện từ	yếu	mạnh
	γ	W^+, W^-, Z^0	g_1 … g_8
	photon	boson yếu	gluon
	Các hạt bức xạ là các boson vector trung gian, có spin là 1. W^- là phản hạt của W^+; photon và Z^0 cũng là phản hạt của chúng. Chỉ có $W^\pm$ và Z^0 có khối lượng.		
Vật chất	thế hệ 1	thế hệ 2	thế hệ 3
Lepton	e	μ	τ
	ν_e	ν_μ	ν_τ
Quark	d	s	t
(mỗi loại có 3 màu)	u	c	b
	Các hạt vật chất là các fermion có spin 1/2; tất cả đều có phản hạt tương ứng. Lepton hoà trộn với nhau và quark cũng thế. Mọi fermion đều có khối lượng.		
Trạng thái chân không			
Boson Higgs	H	có spin 0 và khối lượng là 126 GeV.	

Bảng này không thay đổi nhiều kể từ những năm giữa thập niên 1970, ngoại trừ boson Higgs, được tìm thấy năm 2012. Giả sử là bảng này đã đầy đủ, nó chứa *tất cả* các cấu tử tạo nên vật chất và bức xạ trong thiên nhiên. Như vậy bảng này liệt kê tất cả các cấu tử –

thực sự ‘không thể chia cắt’ hay ‘nguyên tử’, như người Hy lạp đã gọi chúng – của các vật thể và các chùm bức xạ. Các hạt sơ cấp là nền tảng của Khoa học vật liệu, Địa chất học, Thiên văn học, Kỹ thuật, Hoá học, Sinh học, Y học, Thần kinh học và Tâm lý học. Vì lý do này, nó thường được đặc tả dưới dạng các bảng tóm tắt cô đọng trên TV và internet.

Một danh sách đầy đủ các hạt sơ cấp cho phép ta tổ chức lại thành một bảng đầy đủ các tính chất của hạt như trong Bảng 22. Nó liệt kê *tất cả* tính chất của các hạt sơ cấp. Để tiết kiệm chỗ, sắc tích và spin đồng vị yếu không được đề cập một cách rõ ràng. Các kiểu phân rã của các hạt không bền cũng không được cho một cách chi tiết; bạn có thể tìm chúng trong các tài liệu tham khảo tiêu chuẩn. Xem 186

Bảng 22 về các tính chất của hạt cũng khá thú vị. Nó cho phép ta cung cấp một đặc tả *đầy đủ* về các tính chất riêng của *một vật hay một hình ảnh phức hợp bất kỳ.* Lúc bắt đầu cuộc thám hiểm, ta đã tìm kiếm một danh sách đầy đủ của *các tính chất riêng* không đổi của các thực thể chuyển động. Bây giờ thì ta đã có nó. Quyển I, trang 29

BẢNG 22 Tính chất của các hạt sơ cấp.

Hạt	Khối lượng m[a]	Thời gian sống τ hay bề rộng mức năng lượng,[b] kiểu phân rã chính	Spin đồng vị I, spin J,[c] số chẵn lẻ P, số chẵn lẻ điện tích C	Điện tích, spin đồng vị, số lạ,[c] số duyên, số đẹp, số đỉnh: $QISCBT$	Số lepton & số baryon LB
Bức xạ sơ cấp (boson)					
photon γ	0 $(< 2 \cdot 10^{-54}$ kg)	bền	$I(J^{PC}) = 0, 1(1^{--})$	000000	0, 0
$W^{\pm}$	$80.385(15)\,\mathrm{GeV}/c^2$	2.085(42) GeV 67.60(27) % hadron, 32.40(27) % $l^{+}\nu$	$J = 1$	±100000	0, 0
Z	$91.1876(21)\,\mathrm{GeV}/c^2$	0.265(1) ys $= 2.4952(23)\,\mathrm{GeV}/c^2$ 69.91(6) % hadron 10.0974(69) % $l^{+}l^{-}$	$J = 1$	000000	0, 0
gluon	0	bền	$I(J^P) = 0(1^-)$	000000	0, 0
Vật chất sơ cấp (fermion): lepton					
electron e	$9.109\,382\,91(40) \cdot 10^{-31}$ kg $= 81.871\,0506(36)\,\mathrm{pJ}/c^2$ $= 0.510\,998\,928(11)\,\mathrm{MeV}/c^2 = 0.000\,548\,579\,909\,46(22)$ u tỷ số hồi chuyển từ $\mu_e/\mu_B = -1.001\,159\,652\,180\,76(27)$ moment lưỡng cực điện[e] $d =< 0.87 \cdot 10^{-30} e\,\mathrm{m}$	$> 13 \cdot 10^{30}$ s	$J = \frac{1}{2}$	−100 000	1, 0
muon μ	0.188 353 109(16) yg $= 105.658\,3715(35)\,\mathrm{MeV}/c^2 = 0.113\,428\,9267(29)$ u	2.196 9811(22) μs 99 % $e^{-}\bar{\nu}_e \nu_\mu$	$J = \frac{1}{2}$	−100000	1, 0

Hạt	Khối lượng m^a	Thời gian sống τ hay bề rộng mức năng lượng,^{b} kiểu phân rã chính	Spin đồng vị I, spin J,^{c} số chẵn lẻ P, số chẵn lẻ điện tích C	Điện tích, spin đồng vị, số lạ,^{c} số duyên, số đẹp, số đỉnh: $QISCBT$	Số lepton & số baryon LB
	tỷ số hồi chuyển từ $\mu_\mu/(e\hbar/2m_\mu) = -1.001\,165\,9209(6)$ moment lưỡng cực điện $d = (-0.1 \pm 0.9) \cdot 10^{-21} e\,\text{m}$				
tau τ	$1.776\,82(16)\,\text{GeV}/c^2$	$290.6(1.0)\,\text{fs}$	$J = \frac{1}{2}$	-100000	$1, 0$
neutrino el. ν_e	$< 2\,\text{eV}/c^2$		$J = \frac{1}{2}$		$1, 0$
neutrino muon ν_μ	$< 2\,\text{eV}/c^2$		$J = \frac{1}{2}$		$1, 0$
neutrino tau ν_τ	$< 2\,\text{eV}/c^2$		$J = \frac{1}{2}$		$1, 0$
Vật chất sơ cấp (fermion): quark^f					
up u	1.8 to $3.0\,\text{MeV}/c^2$	xem proton	$I(J^P) = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}^+)$	$+\frac{2}{3}+\frac{1}{2}0000$	$0, \frac{1}{3}$
down d	4.5 to $5.5\,\text{MeV}/c^2$	xem proton	$I(J^P) = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}^+)$	$-\frac{1}{3}-\frac{1}{2}0000$	$0, \frac{1}{3}$
strange s	$95(5)\,\text{MeV}/c^2$		$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$	$-\frac{1}{3}0-1000$	$0, \frac{1}{3}$
charm c	$1.275(25)\,\text{GeV}/c^2$		$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$	$+\frac{2}{3}00+100$	$0, \frac{1}{3}$
bottom b	$4.18(17)\,\text{GeV}/c^2$	$\tau = 1.33(11)\,\text{ps}$	$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$	$-\frac{1}{3}000-10$	$0, \frac{1}{3}$
top t	$173.5(1.4)\,\text{GeV}/c^2$		$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$	$+\frac{2}{3}0000+1$	$0, \frac{1}{3}$
Boson sơ cấp					
Higgs H	$126(1)\,\text{GeV}/c^2$	không đo được	$J = 0$		

Ghi chú:
a. Xem bảng tiền tố SI trên Trang 326. Về đơn vị khối lượng eV/c^2, xem Trang 330.
b. *Độ rộng mức năng lượng* Γ của một hạt liên hệ với thời gian sống của nó τ theo hệ thức bất định $\Gamma\tau = \hbar$. Có một điểm khác nhau giữa *chu kỳ bán rã* $t_{1/2}$ và *thời gian sống* τ của 1 hạt: chúng có mối liên hệ $t_{1/2} = \tau \ln 2$, trong đó $\ln 2 \approx 0.693\,147\,18$; chu kỳ bán rã ngắn hơn thời gian sống. *Đơn vị khối lượng nguyên tử* u được định nghĩa là 1/12 khối lượng của nguyên tử carbon 12 đứng yên ở trạng thái cơ bản. Ta có $1\,\text{u} = \frac{1}{12}m(^{12}\text{C}) = 1.660\,5402(10)\,\text{yg}$.
c. Để giữ cho bảng được ngắn gọn, tiêu đề không đề cập tường minh về *sắc tích*, cường tích. Phần này phải được thêm vào danh sách tính chất cơ bản của các vật. Lượng tử số chứa từ 'số chẵn lẻ' có nhân tính; các số khác có cộng tính. Số chẵn lẻ thời gian T (khác với số đỉnh T), nên gọi là số chẵn lẻ nghịch đảo chuyển động, bằng với CP. Spin đồng vị I (hay I_Z) chỉ xác định đối với quark up, down và các phức hợp của chúng như proton và neutron. Trong các tài liệu khoa học người ta cũng gặp đại lượng số chẵn lẻ G, với $G = (-1)^{IC}$.

Bảng này cũng đề cập tới *nhược tích* của các hạt. Chi tiết về nhược tích g, hay chính xác hơn, *spin đồng vị yếu*, là một lượng tử số gán cho mọi fermion quay trái (và antifermion quay phải) nhưng không gán cho fermion quay phải (và antifermion quay trái), sẽ được đề cập trong phần tương tác yếu. Trang 245
d. 'Số đẹp' hiện nay được gọi là *số đáy*; tương tự, 'số thật' hiện nay được gọi là *số đỉnh*. Dấu của

các lượng tử số S, I, C, B, T có thể được định nghĩa theo cách khác. Trong phép gán chuẩn trình bày dưới đây, dấu của mỗi lượng tử số khác không là dấu điện tích của quark tương ứng.

Xem 214, Xem 215
e. Bán kính electron quan sát được nhỏ hơn 10^{-22} m. Người ta có thể giữ một electron đơn lẻ bằng những cái bẫy trong nhiều tháng.
f. Hãy xem Trang 233 để biết định nghĩa chính xác và ý nghĩa của khối lượng quark.

Một mục tiêu nữa mà ta đã đề ra vào đầu cuộc thám hiểm là tìm ra một danh sách đầy đủ của mọi *tính chất của các trạng thái*. Ta cũng có thể đạt được mục tiêu này, cụ thể là bằng các hàm sóng cùng với các giá trị của trường bắt nguồn từ các boson khác nhau. Nếu nó không phù hợp với độ cong không-thời gian khả hữu, cuộc thám hiểm của ta coi như kết thúc.

Phần chính của mô hình chuẩn là các Lagrangian của các tương tác điện từ, yếu và mạnh. Tổ hợp các Lagrangian, dựa trên các nhóm chuẩn U(1), SU(3) và SU(2)(mất đối xứng) chỉ có thể hiện hữu theo một phương thức riêng. Ta có thể tóm lược Lagrangian bằng giản đồ Feynman trong Hình 150.

Để hoàn thành mô hình chuẩn ta cần các hằng số liên kết của 3 tương tác chuẩn, khối lượng của các hạt và các giá trị của hoà trộn giữa các quark và giữa các lepton. Cùng với tất cả các hằng số thiên nhiên xác định hệ SI và số chiều không-thời gian, bảng sau đây sẽ hoàn thành mô hình chuẩn.

BẢNG 23 Các hằng số vật lý cơ bản.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị theo đơn vị SI	Độ bđ.[a]
Các hằng số dùng để định nghĩa các đơn vị đo lường SI			
Tốc độ ánh sáng trong chân không[c]	c	299 792 458 m/s	0
Độ từ thẩm của chân không[c]	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m	0
		= 1.256 637 061 435 ... μH/m	0
Độ điện thẩm của chân không[c]	$\varepsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$	8.854 187 817 620 ... pF/m	0
Hằng số Planck	h	$6.626\,069\,57(52) \cdot 10^{-34}$ Js	$4.4 \cdot 10^{-8}$
Hằng số Planck rút gọn, lượng tử tác dụng	$\hbar$	$1.054\,571\,726(47) \cdot 10^{-34}$ Js	$4.4 \cdot 10^{-8}$
Điện tích Positron	e	0.160 217 656 5(35) aC	$2.2 \cdot 10^{-8}$
Hằng số Boltzmann	k	$1.380\,6488(13) \cdot 10^{-23}$ J/K	$9.1 \cdot 10^{-7}$
Hằng số hấp dẫn	G	$6.673\,84(80) \cdot 10^{-11}$ Nm^2/kg^2	$1.2 \cdot 10^{-4}$
Hằng số liên kết hấp dẫn	$\kappa = 8\pi G/c^4$	$2.076\,50(25) \cdot 10^{-43}$ s^2/(kg m)	$1.2 \cdot 10^{-4}$
Các hằng số cơ bản (có nguồn gốc không rõ)			
Số chiều của không-thời gian		3 + 1	0[b]
Hằng số cấu trúc tinh tế[d] hay	$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 \hbar c}$	1/137.035 999 074(44)	$3.2 \cdot 10^{-10}$
hằng số liên kết điện từ	$= g_{em}(m_e^2 c^2)$	= 0.007 297 352 5698(24)	$3.2 \cdot 10^{-10}$
Hằng số liên kết Fermi[d] hay	$G_F/(\hbar c)^3$	$1.166\,364(5) \cdot 10^{-5}$ GeV^{-2}	$4.3 \cdot 10^{-6}$
hằng số liên kết yếu	$\alpha_w(M_Z) = g_w^2/(4\pi)$	1/30.1(3)	$1 \cdot 10^{-2}$
Góc hoà trộn yếu	$\sin^2 \theta_W(\overline{MS})$	0.231 24(24)	$1.0 \cdot 10^{-3}$
	$\sin^2 \theta_W$ (trên mặt)	0.2224(19)	$8.7 \cdot 10^{-3}$
	$= 1 - (m_W/m_Z)^2$		

BẢNG 23 (Tiếp theo) Các hằng số vật lý cơ bản.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị theo đơn vị SI	Độ bđ.[a]
Hằng số liên kết mạnh[d]	$\alpha_s(M_Z) = g_s^2/(4\pi)$	0.118(3)	$25 \cdot 10^{-3}$
Matrix hoà trộn quark CKM	$\lvert V \rvert$	$\begin{pmatrix} 0.97428(15) & 0.2253(7) & 0.00347(16) \\ 0.2252(7) & 0.97345(16) & 0.0410(11) \\ 0.00862(26) & 0.0403(11) & 0.999152(45) \end{pmatrix}$	
Bất biến Jarlskog	J	$2.96(20) \cdot 10^{-5}$	
Matrix hoà trộn neutrino PMNS	P	$\begin{pmatrix} 0.82 & 0.55 & -0.15 + 0.038i \\ -0.36 + 0.020i & 0.70 + 0.013i & 0.61 \\ 0.44 + 0.026i & -0.45 + 0.017i & 0.77 \end{pmatrix}$	
Khối lượng hạt sơ cấp: xem bảng ở trên			

a. Độ bất định: độ lệch tiêu chuẩn của sai số của phép đo.
b. Chỉ đo từ 10^{-19} m tới 10^{26} m.
c. Hằng số định nghĩa.
d. Mọi hằng số tương tác đều phụ thuộc vào sự chuyển động lượng 4 chiều, như đã giải thích trong phần tái chuẩn hoá. *Hằng số cấu trúc tinh tế* là tên truyền thống của hằng số tương tác điện từ g_{em} trong trường hợp chuyển động lượng 4 chiều có $Q^2 = m_e^2 c^2$, là số khả hữu nhỏ nhất. Ở các mức chuyển động lượng lớn nó có giá trị lớn hơn, thí dụ như $g_{em}(Q^2 = M_W^2 c^2) \approx 1/128$. Trái lại, hằng số tương tác mạnh có giá trị nhỏ hơn khi sự chuyển động lượng lớn hơn, thí dụ như $\alpha_s(34\,\text{GeV}) = 0.14(2)$.

Page 131

Tóm lại, với 3 bảng và 1 hình, mô hình chuẩn mô tả *mọi* thí nghiệm đã thực hiện trong không-thời gian phẳng. Đặc biệt, mô hình chuẩn bao gồm lượng tử tác dụng, tốc độ cực đại, sự lượng tử hoá điện tích và nguyên lý tác dụng cực tiểu.

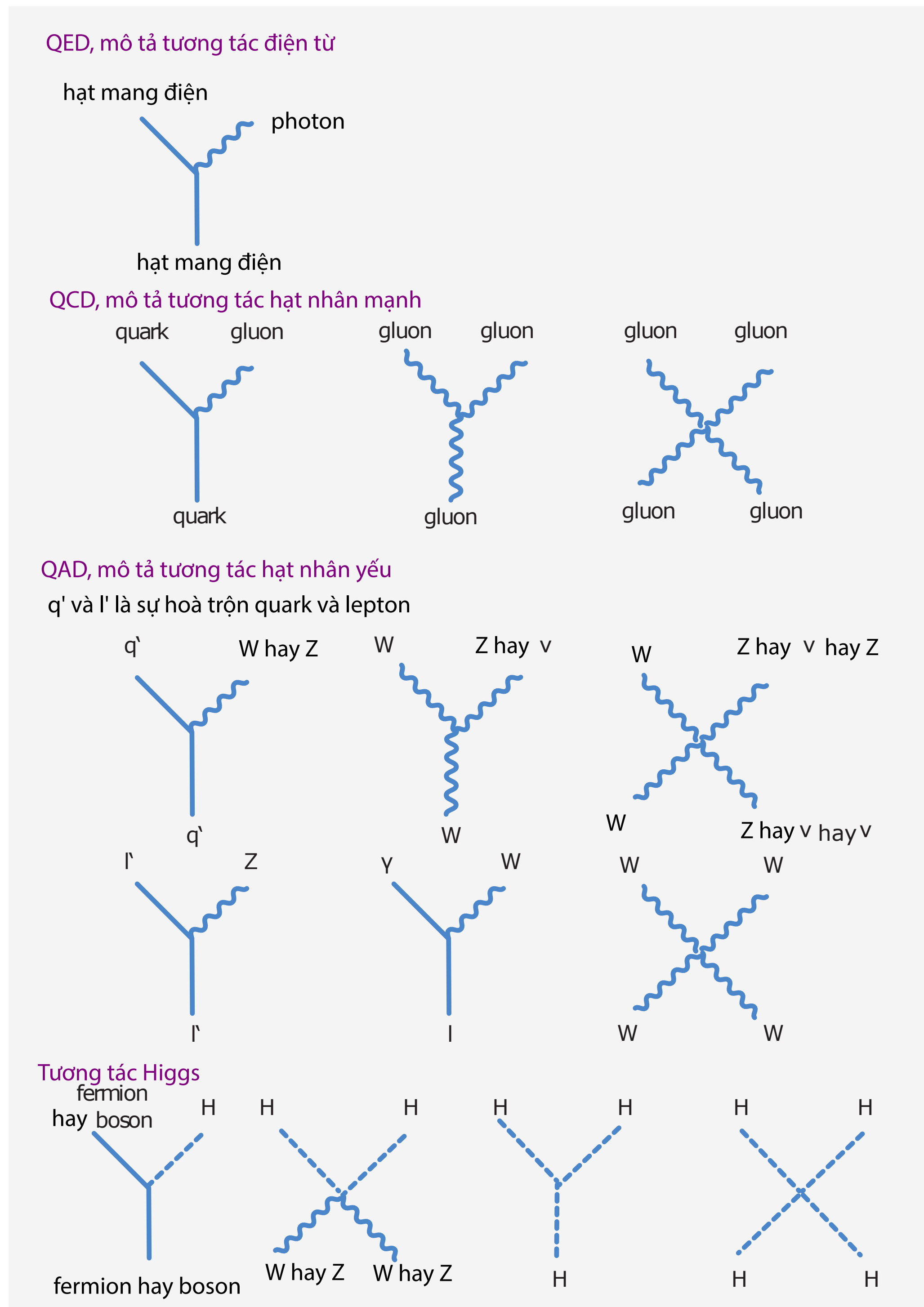
Tóm tắt và các vấn đề chưa giải quyết

Mô hình chuẩn của vật lý hạt phân biệt một cách rõ ràng giữa các hạt *sơ cấp* và các hạt *phức hợp*. Mô hình chuẩn cung cấp một danh sách đầy đủ các tính chất đặc trưng cho một hạt – tức là một vật chuyển động hay một hình ảnh bất kỳ. Các tính chất này là: khối lượng, spin, điện tích, sắc tích, nhược tích, số chẵn lẻ, số chẵn lẻ điện tích, spin đồng vị, số lạ, số duyên, số đỉnh, số đẹp, số lepton và số baryon.

Mô hình chuẩn mô tả tương tác điện từ và hạt nhân là sự trao đổi các hạt bức xạ ảo. Đặc biệt, mô hình chuẩn mô tả rất chính xác 3 loại bức xạ mà ta thấy trong thiên nhiên bằng cách sử dụng các nhóm chuẩn. Mô hình chuẩn dựa trên sự lượng tử hoá và sự bảo toàn điện tích, nhược tích và sắc tích, cũng như dựa trên tác dụng cực tiểu $\hbar$ và tốc độ năng lượng cực đại c. Kết quả là mô hình chuẩn mô tả cấu trúc của nguyên tử, sự hình thành của chúng trong lịch sử vũ trụ, tính chất của vật chất và cơ chế của sự sống. Không kể tiền tài và danh vọng thì mô hình chuẩn rất phù hợp với thực nghiệm.

Tóm lại, mô hình chuẩn đã hiện thực hoá giấc mơ của Leucippus và Democritus, cộng thêm một điều: ta biết được các viên gạch tạo thành vật chất và bức xạ, lại biết được cách chúng chuyển động, tương tác và biến đổi trong không-thời gian phẳng với một độ chính xác thật *hoàn hảo*.

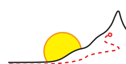
Không kể sự chính xác hoàn hảo này ta vẫn còn *chưa* biết:

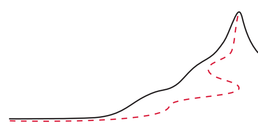


HÌNH 150 Các giản đồ Feynman của mô hình chuẩn.

— Nguồn gốc các hằng số liên kết.
— Lý do positron và proton có cùng điện tích.
— Nguồn gốc khối lượng của các hạt.
— Nguồn gốc sự hoà trộn và tham số vi phạm CP.
— Nguồn gốc các nhóm chuẩn.
— Nguồn gốc 3 thế hệ hạt.
— Khái niệm hạt còn tồn tại ở mức năng lượng cao hay không.
— Điều gì sẽ xảy ra trong không-thời gian cong.

Để nghiên cứu những để tài này, cách đơn giản nhất là tìm hiểu thiên nhiên lúc hạt có năng lượng lớn nhất. Có 2 phương pháp: tạo dựng các thí nghiệm lớn và tìm hiểu các mô hình giả định. Cả 2 cách đều hữu ích.





Chương 10
Giấc mơ thống nhất

> Materie ist geronnenes Licht.**
>
> Albertus Magnus

Ba loại tương tác của hạt có chung một nguồn gốc không? Ta đã thấy trong các chương trước là mật độ Lagrangian của 3 loại tương tác chuẩn được xác định một cách duy nhất bởi 2 điều kiện: có đối xứng chuẩn và nhất quán với không-thời gian thông qua bất biến Lorentz và tính tái chuẩn hoá được. Tìm kiếm *sự thống nhất* của các tương tác như vậy có nghĩa là phải xác định một sự đối xứng thống nhất của thiên
Câu đố 137 s nhiên. (Bạn có đồng ý như vậy không?)

Trong khoảng từ năm 1970 đến 2015, nhiều giả định đã nhen nhóm các hy vọng đạt tới sự thống nhất thông qua sự đối xứng ở mức độ cao hơn. Phổ biến nhất là Mô hình đại thống nhất, Siêu đối xứng, Thuyết trường bảo giác, Tính đối ngẫu hằng số liên kết và Thuyết trường lượng tử toán học. Chúng ta sẽ tóm lược về các nỗ lực này bắt đầu từ ứng viên đầu tiên, có khái niệm xem như đơn giản nhất.

Mô hình đại thống nhất

Ở các mức năng lượng đo được tính đến năm 2016, nhỏ hơn 3 TeV, thì không có sự mâu thuẫn giữa Lagrangian của mô hình chuẩn và thực nghiệm. Mặt khác, người ta có thể giả định Lagrangian là một sự gần đúng ở mức năng lượng thấp đối với Lý thuyết thống nhất. Điều kiện này phải có – lưu ý rằng, đây là một sự tin tưởng – để ta có thể tìm được một phép đối xứng thống nhất *chứa* các đối xứng của tương tác điện nhược và tương tác mạnh như các nhóm con. Theo cách này thì 3 tương tác chuẩn sẽ là các mặt khác nhau của một tương tác 'thống nhất'. Lúc đó ta có thể xem xét các tính chất vật lý rút ra từ nhóm đối xứng thống nhất này rồi so sánh chúng với thực nghiệm. Cách tiếp cận này được gọi là *Mô hình đại thống nhất*, cố gắng mô tả một cách thống nhất tất cả các loại vật chất. Mọi loại hạt sơ cấp mà ta đã biết đều được xem như các trường xuất hiện trong Lagrangian được xác định bởi 1 nhóm đối xứng chuẩn đơn lẻ.

Giống như các thuyết chuẩn được mô tả cho tới nay, Lagrangian đại thống nhất được xác định bằng nhóm đối xứng, cách biểu diễn của mỗi hạt và hằng số liên kết tương ứng.
Xem 216 Việc tìm kiếm một nhóm đại đối xứng tổng quát khởi đầu với các nhóm Lie (nửa đơn) chứa $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$. Các nhóm nhỏ nhất có tính chất này là SU(5), SO(10) và

** 'Vật chất là ánh sáng ngưng tụ lại.' Albertus Magnus (b. *c.* 1192 Lauingen, d. 1280 Cologne) là tư tưởng gia lớn vào thời của ông.

E(6); chúng được định nghĩa trong Phụ lục 15. Đối với mỗi nhóm ứng viên này, người
Xem 217 ta có thể nghiên cứu và so sánh các hệ quả của mô hình với thực nghiệm.

So sánh các tiên đoán và dữ liệu thực nghiệm

Mô hình đại thống nhất – còn được gọi một cách sai lầm là GUT hay *grand unified theories* – đã có nhiều tiên đoán phù hợp với thực nghiệm. Trước hết, một mô hình đại thống nhất bất kỳ phải tiên đoán được các mối liên hệ giữa các lượng tử số của quark và lepton. Đặc biệt, mô hình giải thích được lý do điện tích của electron ngược dấu với điện tích của proton.

Mô hình đại thống nhất tiên đoán được giá trị của góc hoà trộn yếu θ_{w} trong khi Mô
Xem 216 hình chuẩn không xác định được góc này. Giá trị mới nhất,

$$\sin^2 \theta_{\mathrm{w,th}} = 0.2 \tag{103}$$

rất gần với giá trị đo được là

$$\sin^2 \theta_{\mathrm{w,ex}} = 0.231(1) \,, \tag{104}$$

tuy không khớp lắm nhưng có thể đúng, theo quan điểm gần đúng trong tính toán.

Mọi mô hình đại thống nhất đều tiên đoán sự hiện hữu của *các đơn cực từ*, như Gerard
Xem 218 't Hooft đã chứng minh. Tuy vậy, dù tích cực tìm kiếm, người ta vẫn chưa tìm ra được những hạt như vậy. Đơn cực từ rất quan trọng ngay cả khi trong cả vũ trụ này chỉ có một
Xem 219 hạt: sự hiện hữu của nó hàm ý điện tích bị lượng tử hoá. Nếu người ta tìm thấy đơn cực từ thì mô hình sẽ giải thích được nguyên do điện tích xuất hiện dưới dạng bội của một đơn vị nhỏ nhất.

Mô hình đại thống nhất tiên đoán sự hiện hữu của các boson vector trung gian nặng là *boson X*. Tương tác liên quan tới các boson này không bảo toàn số baryon hay lepton mà chỉ bảo toàn hiệu $B - L$. Để nhất quán với dữ liệu, các boson X phải có khối lượng vào cỡ 10^{16} GeV. Tuy vậy, khối lượng này luôn luôn nằm ngoài phạm vi các thí nghiệm nên ta không thể kiểm chứng được điều tiên đoán.

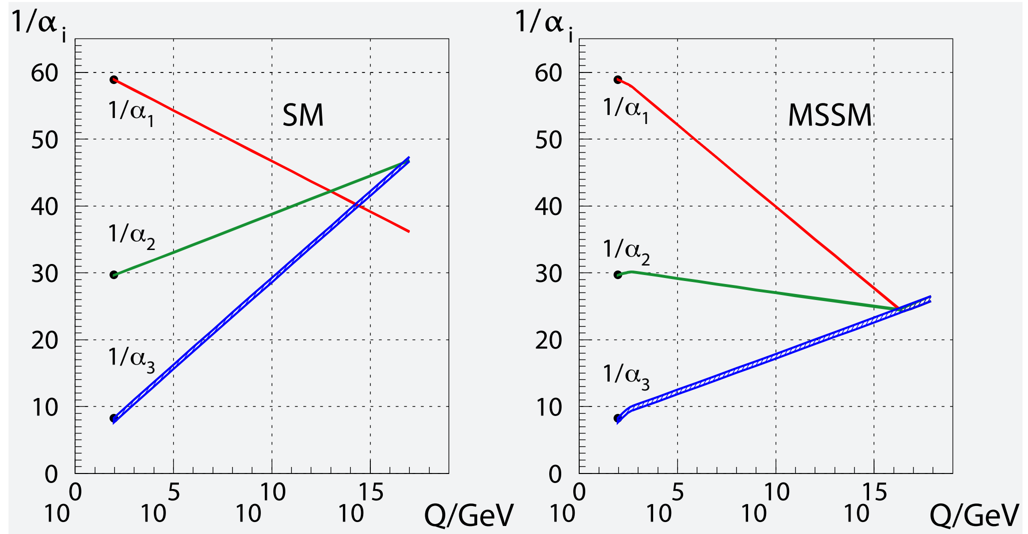
Điều ngoạn mục nhất là các boson X hàm ý rằng có *sự phân rã proton*. Điều này đã được Pati và Abdus Salam tiên đoán lần đầu tiên vào năm 1974. Nếu proton phân rã thì có nghĩa là than hay kim cương * – và các vật liệu khác – không thể tồn tại lâu dài. Dựa vào nhóm đối xứng, Mô hình đại thống nhất tiên đoán rằng proton phân rã thành pion, electron, kaon hay các hạt khác. Dĩ nhiên chúng ta biết rõ 'như lòng bàn tay' là thời gian sống của proton cao hơn nếu không ta sẽ qua đời vì ung thư bạch cầu; nói cách khác, tỷ lệ ung thư trên thế giới đã chứng tỏ rằng thời gian sống của proton $> 10^{16}$ năm.

Các tính toán chi tiết thời gian sống của proton τ_p bằng cách sử dụng nhóm chuẩn
Xem 216 SU(5) cho ta biểu thức

$$\tau_{\mathrm{p}} \approx \frac{1}{\alpha_G^2(M_{\mathrm{X}})} \frac{M_{\mathrm{X}}^4}{M_{\mathrm{p}}^5} \approx 10^{31\pm1}\ \mathrm{a} \tag{105}$$

trong đó sai số bắt nguồn từ sai số của M_{X} của boson chuẩn có liên quan và cơ chế phân

* Vì như ta đã biết kim cương không bền nhưng nửa bền; như vậy kim cương không tồn tại mãi nhưng than thì có thể, miễn là proton không phân rã.



HÌNH 151 Sự biến thiên của 3 hằng số liên kết theo năng lượng đối với Mô hình đại thống nhất đơn giản (hình bên trái) và mô hình siêu đối xứng cực tiểu (hình bên phải); đồ thị biểu diễn các hằng số $\alpha_1 = \frac{5}{3}\alpha_{em}/\cos^2\theta_W$ đối với tương tác điện từ (thừa số 5/3 xuất hiện trong GUTs), $\alpha_2 = \alpha_{em}/\sin^2\theta_W$ đối với tương tác yếu và hằng số liên kết mạnh $\alpha_3 = \alpha_s$ (© W. de Boer).

rã. Nhiều thí nghiệm lớn đã và đang được tiến hành để cố gắng đo thời gian sống này. Cho đến nay thì kết quả tuy đơn giản nhưng rõ ràng. Người ta chưa thấy một phân rã Xem 220 proton nào. Dữ liệu có thể tóm tắt bằng các hệ thức sau

$$\begin{aligned}\tau(p \rightarrow e^+ \pi^0) &> 5 \cdot 10^{33}\ \text{a}\\ \tau(p \rightarrow K^+ \bar{\nu}) &> 1.6 \cdot 10^{33}\ \text{a}\\ \tau(n \rightarrow e^+ \pi^-) &> 5 \cdot 10^{33}\ \text{a}\\ \tau(n \rightarrow K^0 \bar{\nu}) &> 1.7 \cdot 10^{32}\ \text{a}\end{aligned} \qquad (106)$$

Các giá trị này lớn hơn sự tiên đoán của mô hình SU(5) – và SO(10). Đối với các ứng viên nhóm chuẩn khác, các thí nghiệm về phân rã proton cần nhiều thời gian hơn.

Tình trạng của Mô hình đại thống nhất

Để giải quyết dứt điểm vấn đề của Mô hình đại thống nhất, người ta phải kiểm tra một tiên đoán cuối cùng: sự thống nhất của các hằng số liên kết. Phần lớn các ước tính về năng lượng của Mô hình đại thống nhất đều gần năng lượng Planck, năng lượng lúc lực hấp dẫn giữa các hạt có vai trò quan trọng. Vì mô hình này không tính đến lực hấp dẫn nên trong một thời gian dài đã nảy sinh một mối nghi ngờ là có thiếu sót trong cách tiếp cận. Điều nghi ngờ này trở nên chắc chắn khi người ta thực hiện được các phép đo chính Xem 221 xác các hằng số liên kết vào năm 1991, được biểu diễn trong các đồ thị của Hình 151. Tiên đoán của GUT về sự biến đổi của các hằng số theo năng lượng dẫn tới kết quả 3 hằng số này *không* gặp nhau tại một điểm. Mô hình đại thống nhất đơn giản gồm SU(5), SU(10) hay E_6 bị thực nghiệm loại trừ.

Tình trạng này sẽ thay đổi nếu ta tính đến *Siêu đối xứng*. Siêu đối xứng là một giả định có tính đến tác dụng của lực hấp dẫn ở mức năng lượng thấp trong thế giới vi hạt. Trang 271 Siêu đối xứng giả định rằng các hạt sơ cấp mới làm thay đổi đường cong ở mức năng lượng trung bình sao cho các đường này gặp nhau tại giá trị năng lượng đại thống nhất là vào khoảng 10^{16} GeV. (Độ dày của đường biểu diễn trong Hình 151 biểu diễn sai số của thí nghiệm.) Việc bao gồm siêu đối xứng đã đưa thời gian sống của proton trở lại giá trị cao hơn (nhưng không nhiều) giới hạn thực nghiệm hiện nay và tiên đoán đúng giá trị của góc hoà trộn. Với Siêu đối xứng, người ta có thể tận dụng Thuyết đại thống nhất (sự lượng tử hoá điện tích, một hằng số liên kết) mà không mâu thuẫn với thực nghiệm.

Tóm lại, Mô hình đại thống nhất mâu thuẫn với thực nghiệm. Điều này không có gì lạ, vì mục đích của nó – thống nhất sự mô tả vật chất – *không thể* đạt được bằng cách này. Thật vậy, nhóm chuẩn thống nhất phải được thêm vào ngay từ đầu. Việc thêm nhóm này là cần thiết vì mô hình không thể suy ra nhóm chuẩn từ một nguyên lý tổng quát. Mô hình cũng không thể cho ta biết đầy đủ về các hạt sơ cấp có trong thiên nhiên. Nói cách khác, nó chỉ *dời* vấn đề mở của mô hình chuẩn sang mức kế tiếp, trong khi phần lớn các vấn đề vẫn chưa được trả lời. Tên 'đại thống nhất' sai ngay từ đầu.

Việc tìm kiếm các đối xứng ở mức cao hơn

Vì ta muốn lên đến đỉnh Hành sơn nên phải tiếp tục lên đường. Ta đã thấy trong các phần trước là phần chính của Lagrangian dùng mô tả chuyển động là các tính chất đối xứng. Ta cũng nhắc lại là Lagrangian chỉ là tên gọi toán học của khái niệm đo lường sự thay đổi. Việc khám phá đúng loại đối xứng cùng với sự nhất quán về mặt toán học, thường hạn chế khả năng lựa chọn Lagrangian xuống tới một con số giới hạn và trường hợp tốt nhất là 1. Lagrangian này cho phép ta đưa ra các tiên đoán thực nghiệm.

Lịch sử của Vật lý hạt từ 1920 tới 1965 đã cho ta thấy rằng sự tiến bộ luôn gắn liền với sự khám phá các đối xứng *rộng lớn hơn*, theo ý nghĩa là các đối xứng mới khám phá luôn bao gồm các đối xứng cũ như các nhóm con. Do đó trong thế kỷ 20, các nhà nghiên cứu tìm kiếm các đối xứng khả hữu lớn nhất, cùng nhất quán với thực nghiệm và lý thuyết chuẩn. Vì Mô hình đại thống nhất đã thất bại nên một tiếp cận tốt hơn phải là việc trực tiếp tìm ra một phép đối xứng bao gồm cả lực hấp dẫn.

Siêu đối xứng

Trong việc tìm kiếm các đối xứng khả hữu của Lagrangian để mô tả một lý thuyết chuẩn và lực hấp dẫn, có một cách là tìm các định lý toán học tổng quát hạn chế các đối xứng Xem 222 Lagrangian có thể có.

Xem 223 Định lý nổi tiếng của Coleman và Mandula phát biểu rằng nếu các phép biến đổi đối xứng, biến đổi các fermion thành fermion và boson thành boson, thì chỉ có các đại lượng sau đây được bảo toàn:

- Tensor năng động lượng $T^{\mu\nu}$, một hệ quả của phép đối xứng không-thời gian Poincaré *ngoài* và
- Các lượng tử số trong, tất cả các đại lượng vô hướng, liên kết với phần tử sinh của mỗi nhóm chuẩn – như điện tích, sắc tích, ... và hệ quả của các phép đối xứng *trong* của Lagrangian.

Nhưng vẫn còn một sự mở rộng, nếu ta xem xét các phép biến đổi *hoà trộn* fermion và

boson thì có thể có thêm các đại lượng bảo toàn mới. Họ các phép đối xứng này bao gồm lực hấp dẫn và được gọi là *siêu đối xứng*. Các đại lượng được bảo toàn không phải là đại lượng vô hướng mà là các *spinor*. Do đó, không có siêu đối xứng *cổ điển*; nó thuần tuý là đối xứng cơ lượng tử. Việc nghiên cứu siêu đối xứng đã trở thành một lĩnh vực nghiên cứu phổ biến. Siêu đối xứng tổng quát hoá lý thuyết chuẩn thành lý thuyết siêu chuẩn. Các nhóm siêu chuẩn khả hữu đã được phân loại đầy đủ.

Siêu đối xứng có thể mở rộng để sát nhập thêm lực hấp dẫn bằng cách thay đổi nó thành một lý thuyết chuẩn địa phương; trong trường hợp đó ta gọi là *siêu hấp dẫn*. Siêu hấp dẫn dựa trên ý tưởng toạ độ có thể có tính chất fermion hay boson. Như vậy siêu hấp dẫn có một cách trình bày riêng về tính chất của không-thời gian ở các khoảng cách nhỏ. Siêu hấp dẫn tiên đoán sẽ có thêm N tích spinor được bảo toàn. Số N nằm trong khoảng 1 và 8; mỗi giá trị có một ứng viên Lagrangian. Trường hợp đơn giản nhất được gọi là siêu hấp dẫn $N = 1$.

Tóm lại, siêu đối xứng là một giả định nhằm thống nhất vật chất và bức xạ ở mức năng lượng thấp. Nhiều nhà nghiên cứu đã giả định rằng siêu đối xứng, và đặc biệt là siêu hấp dẫn $N = 1$, có thể rất gần với thực tại.

Mô hình siêu đối xứng có khoảng 100 hằng số cơ bản, so với 25 của mô hình chuẩn của Vật lý hạt. Các tiên đoán thực nghiệm chính xác, phụ thuộc vào giá trị của các hằng số này. Tuy vậy, có thể có nhiều tiên đoán tổng quát khả hữu mà ta có thể kiểm chứng bằng thực nghiệm.

— Siêu đối xứng tiên đoán các hạt sơ cấp thông thường có các bạn đồng hành gọi là *sparticle*. Người ta đã tiên đoán Fermion là bạn đồng hành của boson và ngược lại. Thí dụ như *photino* là bạn đồng hành fermion của photon, *gluinos* là bạn đồng hành của gluon, *selectron* là bạn đồng hành của electron, ... Tuy vậy, ta chưa thấy hạt nào trong các hạt trên đây.
— Siêu đối xứng cho phép ta thống nhất các hằng số liên kết sao cho tương thích với dữ liệu trên đây. Trang 270
— Siêu đối xứng làm giảm tốc độ phân rã proton mà Thuyết đại thống nhất đã tiên đoán. Độ giảm tốc tương thích với thực nghiệm.
— Siêu đối xứng tiên đoán neutron và các hạt sơ cấp khác có moment lưỡng cực điện. Trị lớn nhất là của neutron, $10^{-30}e$ m, mâu thuẫn với thực nghiệm; các trị nhỏ nhất thì người ta chưa đo được. Để so sánh, ta có trị lớn nhất từ mô hình chuẩn là $10^{-33}e$ m. Đây là một lĩnh vực nghiên cứu thực nghiệm sôi nổi có thể tiết kiệm cho người dân không phải đóng thêm tiền thuế cho các máy gia tốc hạt khổng lồ.

Tuy vậy cho tới thời điểm này, 2016, vẫn *không có* bằng chứng thực nghiệm nào cho thuyết siêu đối xứng. Đặc biệt, máy gia tốc va chạm Hadron khổng lồ ở CERN, Geneva chưa tìm thấy bất cứ dấu hiệu nào của siêu đối xứng. Đúng ra các thí nghiệm loại trừ hầu hết các mô hình hạt siêu đối xứng đã được đề nghị trong quá khứ.

Siêu đối xứng có phải là một thành phần của Thuyết thống nhất không? Câu trả lời an toàn là: không rõ. Câu trả lời tối ưu là: vẫn còn một cơ hội nhỏ để Thuyết siêu đối xứng còn đúng trong thiên nhiên. Câu trả lời bi quan là: siêu đối xứng là một tập hợp niềm tin mâu thuẫn với thực nghiệm và được tạo ra để sửa sai cho sự thất bại của Thuyết đại thống nhất. Quyển cuối cùng của bộ sách này sẽ cho ta biết câu trả lời đúng.

Các nỗ lực khác

Nếu siêu đối xứng không thành công thì có thể ta cần các đối xứng ở mức cao hơn cho mục tiêu thống nhất. Do đó, các nhà nghiên cứu đã thám hiểm các lĩnh vực *nhóm lượng tử*, *không-thời gian không giao hoán*, *phép đối xứng bảo giác*, *thuyết trường lượng tử topo* và các phép đối xứng trừu tượng khác. Không có cách tiếp cận nào đem lại kết quả hữu ích; không có tiên đoán thực nghiệm hay tiến bộ nào hướng tới sự thống nhất. Nhưng có 2 cách tiếp cận nữa, đáng để ta đặc biệt quan tâm: phép đối xứng đối ngẫu và mở rộng sự tái chuẩn hoá.

Tính đối ngẫu – tính đối xứng lạ thường nhất của thiên nhiên

Năm 1977 đã có một phát kiến quan trọng trong vật lý toán, khi Claus Montonen và David Olive đã chứng minh rằng khái niệm đối xứng chuẩn có thể mở rộng một cách bất ngờ bằng một phương thức mới lạ khác thường.

Lớp các phép biến đổi đối xứng chuẩn, hoá ra chỉ là lớp đầu tiên trong lĩnh vực đó. Lớp này bao gồm phép đối xứng chuẩn, đối xứng không-thời gian, đảo chiều chuyển động, tính chẵn lẻ, đối xứng vị và siêu đối xứng.

Lớp thứ nhì, mới, hoàn toàn khác. Đối với các hằng số liên kết của thiên nhiên, ta có thể tưởng tượng rằng chúng là các phần tử của một không gian các hằng số liên kết khả hữu, liên tục, được gọi là *không gian tham số*.* Montonen và Olive đã chứng tỏ rằng có phép biến đổi trong không gian tham số mà vẫn để cho thiên nhiên bất biến. Các phép biến đổi này tạo thành một lớp các phép đối xứng mới của thiên nhiên.

Đúng ra ta đã gặp một phần tử: phép đối xứng tái chuẩn hoá. Nhưng Olive và Montonen mở rộng lớp đối xứng này rất nhiều qua việc khám phá *tính đối ngẫu điện từ*. Tính đối ngẫu điện từ là một phép hoán đổi đối xứng rời rạc

Quyển III, trang 92

$$e \leftrightarrow \frac{4\pi\hbar c}{e} \tag{107}$$

trong đó vế phải hoá ra là đơn vị của từ tích. Tính đối ngẫu điện từ liên hệ điện tích e với từ tích m

$$Q_{\text{el}} = me \quad \text{và} \quad Q_{\text{mag}} = ng = 2\pi\hbar c/e \tag{108}$$

và đặt chúng ngang hàng với nhau. Nói cách khác, phép biến đổi hoán chuyển

$$\alpha \leftrightarrow \frac{1}{\alpha} \quad \text{hay} \quad \frac{1}{137.04} \leftrightarrow 137.04\,, \tag{109}$$

và như vậy hoán chuyển liên kết mạnh và yếu với nhau. Hoặc có thể nói rằng, phép đối ngẫu điện từ liên hệ một trạng thái nơi mà hạt có vai trò quan trọng (trạng thái liên kết yếu) với một trạng thái nơi mà hạt không quan trọng (trạng thái liên kết mạnh). Nó là phép đối xứng dị thường nhất trong các phép đối xứng mà ta đã gặp.

Tính đối ngẫu là mối liên kết sâu sắc nhất trong vật lý. Chúng chứa $\hbar$ và như vậy chúng có tính lượng tử thực sự. Chúng không có trong Vật lý cổ điển nên rõ ràng là

* Không gian lời giải đối với mọi giá trị của tham số được gọi là *không gian moduli*.

Thuyết lượng tử căn bản hơn Vật lý cổ điển. Nói cho rõ hơn thì tính đối ngẫu thực sự là một phép đối xứng phi cổ điển. Tính đối ngẫu chứng tỏ Thuyết lượng tử có tính độc lập.

Nếu ta muốn hiểu được giá trị của các tham số khó hiểu như hằng số liên kết thì điều hiển nhiên là ta phải nghiên cứu *tất cả* các phép đối xứng khả hữu trong không gian tham số, tức là mọi phép đối xứng khả hữu trong lớp thứ 2, và có thể kết hợp với các phép đối xứng trong lớp thứ nhất. Thật vậy, sự tổ hợp tính đối ngẫu với siêu đối xứng được nghiên cứu trong Thuyết siêu dây.

Quyển VI, trang 141
Xem 224

Các nghiên cứu phân tích đều chứng tỏ rằng có nhiều loại đối ngẫu, tất cả đều là các phép đối xứng *không nhiễu loạn*:

— Đối ngẫu S, tổng quát hoá của đối ngẫu điện từ đối với mọi tương tác;
— Đối ngẫu T, còn gọi là đối ngẫu không-thời gian, một ánh xạ giữa chiều dài lớn và nhỏ với thời gian như sau $l \leftrightarrow l_{\text{Pl}}^2/l$;*
— Đối ngẫu hồng ngoại.

Dù hấp dẫn về ý tưởng nhưng nghiên cứu tính đối ngẫu đã không mang lại một tiên đoán thực nghiệm nào. Tuy vậy, các kết quả đã nêu bật một hướng khác để tiếp cận Thuyết trường lượng tử. Tính đối ngẫu đóng một vai trò quan trọng trong Thuyết siêu dây, mà ta sẽ tìm hiểu sau.

Quyển VI, trang 141

Tính tập thể của Thuyết trường lượng tử

Trong nhiều thập niên các nhà toán học đã hỏi các nhà vật lý: bản chất của Thuyết trường lượng tử là gì? Mặc dù đã nỗ lực nghiên cứu người ta vẫn chưa có câu trả lời chính xác cho câu hỏi này.

Phân nửa số câu trả lời là định nghĩa thông thường có trong sách giáo khoa vật lý: QFT là phương thức tổng quát nhất dùng để mô tả các hệ liên tục theo kiểu cơ lượng tử bằng một số *hữu hạn* các loại lượng tử nhưng có số bậc tự do *vô hạn*. Định nghĩa này hàm ý rằng Lagrangian phải bất biến tương đối tính và phải được mô tả bằng một lý thuyết chuẩn. Tuy vậy, nửa câu trả lời này đã đủ gây ra phiền toái. Ta sẽ chứng tỏ trong phần kế tiếp của cuộc hành trình lên đỉnh rằng không thời gian có một thang khoảng cách cực tiểu và thiên nhiên không có vô hạn bậc tự do. Nói cách khác, *Thuyết trường lượng tử là một thuyết hiệu dụng*; đây là một cách hiện đại để nói rằng nó có tính gần đúng hay nói thẳng ra là nó sai. Nhưng lúc này ta hãy đặt vấn đề này sang một bên.

Quyển VI, trang 40

Kế đến, vẫn còn nửa câu trả lời chưa biết, sẽ xác định các điều kiện (toán học) mà một hệ vật lý, tức là Lagrangian, cần phải có để trở thành một Thuyết trường lượng tử. Dù có nhiều công trình nghiên cứu của các toán gia nhưng người ta vẫn chưa biết danh sách đầy đủ các điều kiện. Nhưng người ta đã biết rằng danh sách này phải có ít nhất 2 điều kiện. Một, Thuyết trường lượng tử phải *có thể tái chuẩn hoá được*. Hai, Thuyết trường lượng tử phải có tính *tự do tiệm cận*; nói cách khác, sự liên kết phải dần tới 0 khi năng lượng dần tới vô hạn. Điều kiện này phải có để tương tác được định nghĩa đúng. Chỉ có một tập con của các Lagrangian tái chuẩn hoá được, tuân theo điều kiện này.

* Đối ngẫu không-thời gian, phép biến đổi giữa các kích thước lớn và nhỏ, khiến cho người ta phải thắc mắc không biết các hạt có bên trong và bên ngoài hay không. Chúng ta đã gặp câu hỏi này khi nghiên cứu về găng tay. Ta sẽ gặp lại vấn đề này sau đây, khi tìm hiểu sự lộn trái và sự nghịch đảo. Vấn đề này chỉ được minh giải trong quyển cuối cùng của bộ sách này.

Trang 292
Quyển IV, trang 113

Trong không gian 4 chiều, lý thuyết trường lượng tử *duy nhất* có 2 tính chất này là Thuyết chuẩn không Abel. Các Lagrangian này có nhiều tính chất tổng quát không có tính hiển nhiên khi ta tiếp cận chúng theo cách thông thường tức là bằng cách tổng quát hoá Cơ học lượng tử sóng một cách ngây thơ. Cách tiếp cận chuẩn này, có tính chất lịch sử, nhấn mạnh tính *nhiễu loạn*: ta xem các fermion sơ cấp là các lượng tử của trường và tương tác là trao đổi các boson ảo với các bậc nhiễu loạn khác nhau.

Mặt khác, mọi Lagrangian của lý thuyết trường cũng cho thấy 2 cấu hình khác, ngoại trừ hạt, cũng có một vai trò quan trọng. Những lời giải toán học này xuất hiện khi ta theo quan điểm không nhiễu loạn; chúng là các cấu hình *tập thể*.

— Thuyết trường lượng tử cho các lời giải tĩnh có năng lượng hữu hạn, được tạo ra bằng cách tổ hợp các trường không định xứ được gọi là các *soliton*. Trong Thuyết trường lượng tử, soliton thường là các đơn cực từ và dyon; các *skyrmion* nổi tiếng cũng là các soliton. Trong cách tiếp cận này, người ta giả sử rằng các phương trình thực sự của thiên nhiên, khi năng lượng lớn, thì không tuyến tính. Giống như trong Quyển I, trang 315 chất lỏng,người ta mong chờ các lời giải ổn định, định xứ và lan truyền được, các soliton. Các soliton này có thể liên hệ với các hạt đã quan sát.
— Thuyết trường lượng tử cho các lời giải tự đối ngẫu hay phản tự đối ngẫu, được gọi là *instanton*. Instanton có vai trò quan trọng trong QCD và trong Lagrangian cơ bản của thiên nhiên.
— Thuyết trường lượng tử xác định các hạt và tương tác bằng cách sử dụng các khai triển nhiễu loạn. Các hạt có tính không nhiễu loạn không? Khi nào khai triển nhiễu loạn kết thúc? Trong trường hợp này điều gì đã xảy ra? Dù đây là vấn đề cấp thiết, người ta vẫn chưa tìm thấy câu trả lời.

Xem 225 Tất cả các chủ đề hấp dẫn này đã được các nhà vật lý toán tìm hiểu cặn kẽ. Việc nghiên cứu đã đi sâu vào việc tìm hiểu lý thuyết chuẩn. Tuy vậy, chưa có kết quả nào có thể sử dụng để tiếp cận mục tiêu thống nhất.

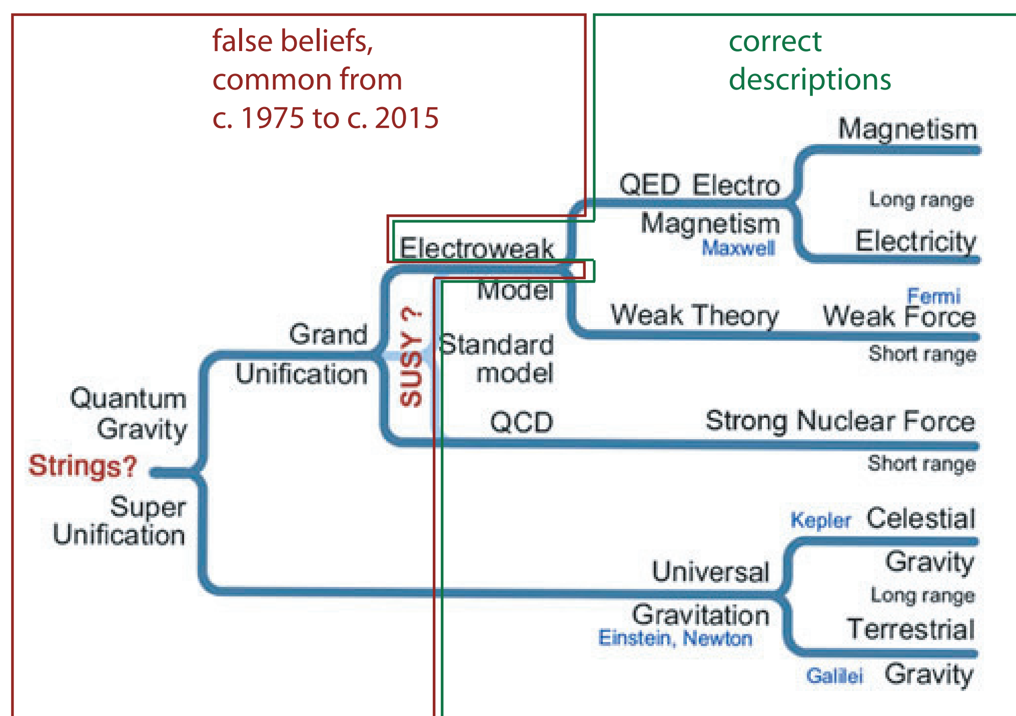
Những điều kỳ lạ về sự thống nhất

Từ thập niên 1970 trở đi, các sơ đồ như Hình 152 đã trở nên quen thuộc. Chúng có mặt trong nhiều quyển sách. Cách tiếp cận hướng về lý thuyết tối hậu của chuyển động đã lấy cảm hứng từ sự thành công của sự thống nhất điện nhược và sự thành công của các lý thuyết gia có ý tưởng về sự đại thống nhất.

Điều không may là thuyết đại thống nhất mâu thuẫn với thực nghiệm. Đúng ra như Trang 252 ta đã giải thích ở trên, ngay cả tương tác điện từ và tương tác yếu cũng chưa thống nhất. (Cũng mất khoảng 10 năm để xoá bỏ niềm tin vào sự mâu thuẫn này; việc này xảy ra do người ta đưa ra thuật ngữ sai lầm 'sự thống nhất điện nhược' thay vì thuật ngữ đúng phải là 'sự tương thích điện nhược' hay 'sự hoà trộn điện nhược'.) Nói cách khác, phần lớn hơn của Hình 152 không đúng. Không may là sơ đồ và câu chuyện đi theo nó đã lôi cuốn nhiều nhà nghiên cứu đi theo con đường sai lầm trong nhiều thập niên.

* *

Theo thời gian, chiều dài của chương này càng ngày càng ngắn. Điều này là do người ta nhận thấy nhiều nỗ lực thống nhất mâu thuẫn với thực nghiệm. Khó mà tính được những nỗ lực lớn lao mà người ta đã bỏ ra, thường là vô ích, trong cuộc trường chinh tìm kiếm sự thống nhất trong việc mô tả chuyển động.



HÌNH 152 Màu xanh và đen: một sơ đồ điển hình về sự thống nhất, như đã thấy nhiều năm qua trong công luận về chủ đề này (© CERN). Màu đỏ và màu lục: phần không đúng và phần đúng.

* *

Để có những hiểu biết ban đầu, cập nhật và chuyên nghiệp, trong lĩnh vực nghiên cứu hạt hiện đại, hãy tham khảo các bài giảng mùa hè dành cho sinh viên tại CERN hằng năm. Ta có thể tìm thấy chúng tại cdsweb.cern.ch/collection/SummerStudentLectures?ln=en.

Tóm tắt về sự thống nhất, toán học và các phép đối xứng cao cấp

Nhiều thập niên nghiên cứu lý thuyết kể từ thập niên 1970 đã chứng tỏ rằng:

> ▷ Vật lý toán *không phải là* phương thức tìm kiếm sự thống nhất của việc mô tả chuyển động.

Mọi tìm kiếm được *ý tưởng toán học* hướng dẫn – bằng các định lý toán học hay sự tổng quát hoá toán học – đã thất bại. Toán học vô dụng trong cuộc chinh phục này. Mô hình chuẩn của Vật lý hạt và Thuyết tương đối tổng quát vẫn còn tách rời nhau. Ngoài ra, nỗ lực nghiên cứu đã dẫn tới nhiều kết quả cụ thể hơn:

> ▷ Việc tìm kiếm một *phép đối xứng cao cấp* trong thiên nhiên đã thất bại.

Dù đã có hàng ngàn bộ óc cực kỳ thông minh tìm hiểu nhiều phép đối xứng cao cấp của thiên nhiên, nỗ lực của họ đã không thành công.

Việc nghiên cứu các phép đối xứng không hữu dụng trong việc tìm kiếm sự thống nhất. Phép đối xứng *đơn giản hoá* sự mô tả thiên nhiên; nhưng đối xứng không *xác định* được sự mô tả. Dường như các nhà nghiên cứu đã rơi vào bẫy của lý thuyết âm nhạc. Bất kỳ ai đã từng học sử dụng một nhạc cụ đều đã nghe câu phát biểu 'toán học là nền tảng của âm nhạc'. Dĩ nhiên điều này vô nghĩa; cảm xúc mới là nền tảng của âm nhạc. Nhưng câu phát biểu sai này đã ẩn nấp trong đầu của các nhạc sĩ. Điểm lại các nghiên cứu trong thế kỷ 20, hình như điều tương tự đã xảy ra cho các nhà nghiên cứu trong lĩnh vực thống nhất. Từ những thất bại này ta kết luận:

▷ Việc thống nhất đòi hỏi tìm ra một nguyên lý *vật lý* làm nền tảng.

Mặt khác, trong thế kỷ 20, các nhà nghiên cứu đã thất bại trong việc tìm kiếm này. Việc thất bại dẫn tới 2 vấn đề. Trong cuộc hành trình tìm kiếm sự thống nhất, có phải là ta cần phải tìm một sự thay thế cho phép đối xứng cao cấp hay không? Và các nhà nghiên cứu có dựa vào các giả định tiềm ẩn, sai lầm về cấu trúc của hạt và không-thời gian hay không? Trước khi tìm hiểu vấn đề hấp dẫn này, ta cần ngừng lại một chút để lấy lại niềm cảm hứng.



Chương 11

Vi khuẩn, ruồi và gút

> “La première et la plus belle qualité de la nature est le mouvement qui l'agite sans cesse ; mais ce mouvement n'est qu'une suite perpétuelle de crimes ; ce n'est que par des crimes qu'elle le conserve.”
> Donatien de Sade, *Justine, ou les malheurs de la vertu.***

Các thực thể dễ thay đổi, đặc biệt là sứa hay amip mở ra một cái nhìn mới mẻ về thế giới chuyển động, nếu ta để cho tính tò mò dẫn dắt ta nghiên cứu chúng một cách chi tiết. Chúng ta đã bỏ lỡ nhiều nhận thức thú vị khi để chúng qua một bên cho tới bây giờ. Đúng ra các thực thể linh động tạo ra một sự liên hệ đáng kinh ngạc giữa sự thay đổi hình dạng và chuyển động, rất hữu dụng cho phần hành trình lên đỉnh vừa qua. Thay vì nhìn sự vật theo chiều hướng ngày càng nhỏ đi, bây giờ ta hãy dùng một ít thời gian để nhìn vào chuyển động thông thường và mô tả toán học của chúng.

Để thưởng thức chương này ta hãy thay đổi một thói quen đáng yêu. Cho tới bây giờ, ta luôn luôn mô tả một chuyển động tổng quát bao gồm chuyển động của các *chất điểm*. Cách làm này hoạt động tốt trong Vật lý cổ điển, Thuyết tương đối tổng quát và Thuyết lượng tử; ta đã dựa trên cách tiếp cận này khi ngấm ngầm giả sử rằng trong chuyển động ta có thể theo dõi riêng rẽ từng điểm của hệ phức hợp. Nhưng rồi ta thấy rằng giả sử như vậy *không* đúng ở những thang đo nhỏ nhất. Do đó cách mô tả chuyển động của các vật thể *linh hoạt* hữu dụng nhất là sử dụng những phương pháp không đòi hỏi theo dõi từng phần của vật. Trong chương này ta sẽ tìm hiểu những phương pháp như vậy; làm việc này cũng có những điều thú vị riêng của nó.

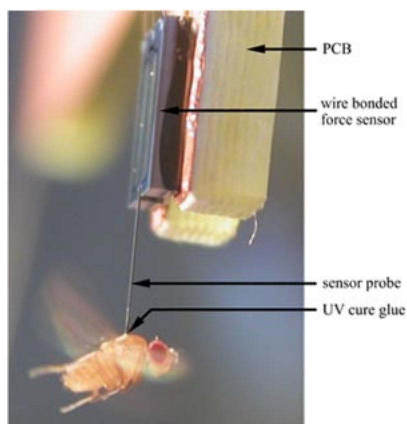
Nếu ta mô tả các hạt sơ cấp như các thực thể linh hoạt – vì ta sẽ phải làm như vậy – thì một hạt chuyển động xuyên qua không gian cũng giống như một con cá heo bơi trong nước, một con ong bay trong không khí, một xoáy nước chuyển động trong chất lỏng.

Quyển VI, trang 117

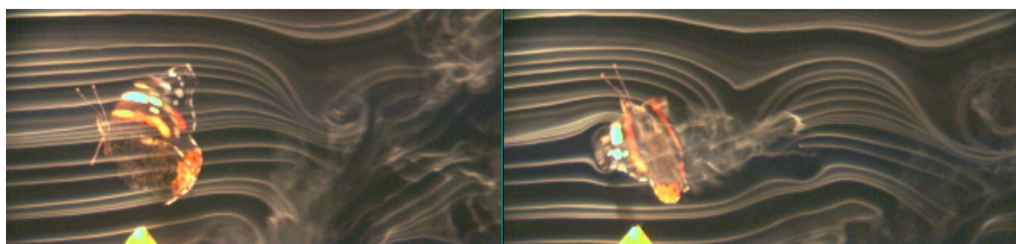
Ong nghệ và các hệ bay thu nhỏ khác

Nếu một con bướm bay qua cuộc hành trình của ta, hãy ngừng lại một lúc để tán thưởng một sự kiện đơn giản: con bướm bay và nó khá nhỏ. Nếu ta để một số trái cây đã cắt trong

** 'Các phẩm chất nguyên sơ và mỹ lệ nhất của thiên nhiên là chuyển động, luôn luôn khuấy động; nhưng chuyển động này chỉ đơn giản là một hậu quả trường cửu của tội lỗi; nó tự bảo toàn bằng tội lỗi.' Donatien Alphonse François de Sade (b. 1740 Paris, d. 1814 Charenton-Saint-Maurice) là một văn sĩ bạo liệt có tên tạo ra từ 'sadism' (bạo dâm).



HÌNH 153 Một con ruồi đang bay, bị buộc vào một hệ thống vi điện cơ dùng để đo lực (© Bradley Nelson).



HÌNH 154 Xoáy xung quanh cánh bướm (© Robert Srygley/Adrian Thomas).

nhà bếp cho đến khi nó bị hỏng, ta sẽ thấy những con ruồi còn nhỏ hơn (*Drosophila melanogaster*), chỉ vào khoảng 2 mm. Hình 153 cho ta thấy một con ruồi đang bay. Nếu bạn thử xây dựng một mô hình máy bay nhỏ hay chỉ cần bạn so sánh các côn trùng này với một máy bay giấy – có lẽ là một vật nhân tạo nhỏ nhất, bay được mà bạn đã từng thấy – bạn sẽ bắt đầu cảm thông với mức độ hoàn hảo mà sự tiến hoá đã tạo ra khi tối ưu hoá các côn trùng bay.

So với máy bay giấy, côn trùng cũng có động cơ, cánh đập, cảm biến, hệ đạo hàng, bộ ổn định hồi chuyển, cơ cấu dùng để hạ cánh và dĩ nhiên mọi tính chất đều bắt nguồn từ sự sống, sinh sản và biến dưỡng, được tích hợp trong một thể tích vô cùng nhỏ. Sự tiến hoá thực sự là một đội kỹ sư xuất sắc. Những máy bay lạ thường nhất, như con ruồi nhà quen thuộc (*Musca domestica*), có thể thay đổi hướng bay chỉ trong 30 ms khi sử dụng một bộ ổn định mà thiên nhiên đã tặng chúng, bằng cách chỉnh hình cặp cánh nguyên thuỷ thứ 2. Con người càng ngày càng quan tâm đến những giải pháp kỹ thuật mà sự tiến hoá đã phát triển; nhiều kỹ sư đang cố gắng đạt tới sự tiểu hình hoá tương tự. Chủ đề hệ bay thu nhỏ rất rộng lớn, vì vậy ta chỉ xét qua vài thí dụ. Xem 226

Làm thế nào mà một con ong nghệ (Bombus terrestris) bay được? Lực nâng mg được tạo ra bằng cánh *cố định* (như đã giải thích trước kia) theo hệ thức thực nghiệm Quyển I, trang 362

$$mg = f\,A\,v^2\,\rho \tag{110}$$

trong đó A là diện tích cánh, v là tốc độ cánh trong lưu chất có mật độ ρ. Hệ số f là

một số thuần tuý, thường có giá trị từ 0.2 tới 0.4, phụ thuộc vào góc của cánh và hình
Xem 227 dạng của nó; ở đây ta sử dụng trị trung bình 0.3. Đối với một chiếc Boeing 747, diện tích
Quyển I, trang 39 cánh là 511 m^2, tốc độ cao nhất ở mực nước biển là 250 m/s; ở độ cao 12 km mật độ khí quyển chỉ bằng 1/4 mật độ trên mặt đất, tức là 0.31 kg/m^3. Ta suy ra (một cách chính
Câu đố 138 e xác) Boeing 747 có khối lượng khoảng 300 tấn. Đối với ong nghệ tốc độ là 3 m/s và diện tích cánh 1 cm^2, ta kiếm được khối lượng được nâng là 35 mg, kém xa khối lượng của ong, cụ thể là 1 g. Độ chênh lệch đối với ruồi còn lớn hơn. Nói cách khác, côn trùng không thể bay nếu cánh của nó *cố định*. Nó không thể bay bằng cánh đứng yên dù có một cánh quạt nhỏ gắn vào nó!

Bắt nguồn từ sự giới hạn của cánh cố định có kích thước nhỏ, côn trùng và các loài chim nhỏ phải *đập* cánh, khác với máy bay. Chúng phải làm như vậy không chỉ để cất cánh hay kiếm được độ cao mà còn để tiếp tục bay trong không khí. Trái lại, máy bay tạo ra đủ lực nâng bằng cánh *cố định*. Thật vậy, nếu bạn nhìn một con vật đang bay như trong Hình 155, bạn sẽ nhận thấy rằng con vật càng lớn, chúng càng ít đập cánh (ở tốc độ đang bay).

Bạn có thể suy ra từ phương trình (110) là những con chim hay côn trùng có thể bay
Câu đố 139 s được nhưng con người thì không thể không? Ngược lại, công thức này cũng giải thích (một phần) lý do tại sao máy bay dùng sức người phải rất lớn.*

Nhưng côn trùng, chim nhỏ, cá chim hay dơi phải chuyển động cánh của chúng *như thế nào* để chúng có thể bay được? Đây là một câu hỏi khó và gần đây ta mới có câu trả
Xem 228 lời. Điểm quan trọng là cánh côn trùng chuyển động để tạo ra các xoáy khí ở cạnh trước để nâng côn trùng lên trên. Các nghiên cứu khí động lực học về bướm – như ta thấy
Xem 229 trong Hình 154 – và các nghiên cứu về các mô hình côn trùng phóng đại, chuyển động trong dầu thay vì không khí, đang tìm hiểu phương thức chính xác mà côn trùng đã tận dụng các xoáy lưu chất. Đồng thời, càng ngày càng có nhiều 'chim cơ học' và 'máy bay mô hình' sử dụng cánh đập để tạo ra lực đẩy, đang được tạo dựng trên thế giới. Lĩnh vực này hết sức sôi động.** Các nhà nghiên cứu đặc biệt quan tâm đến việc tìm hiểu phương thức mà các xoáy cho phép thay đổi hướng bay ở kích thước nhỏ điển hình cho côn trùng. Một mục tiêu khác là thu nhỏ kích thước của máy bay.

Biểu thức (110) của lực nâng cánh cố định cũng cho ta thấy điều kiện cần có để cất cánh và hạ cánh an toàn. Lực nâng của tất cả các loại cánh *giảm đi* khi tốc độ giảm. Như vậy cả động vật lẫn máy bay đều *tăng* diện tích cánh trong các trường hợp này. Nhiều loài chim cũng gia tăng mạnh mẽ tốc độ đập cánh. Nhưng ngay cả khi đập mạnh, các cánh lớn thường không đủ khả năng giúp vật cất cánh. Nhiều động vật bay như chim én, tránh đáp hẳn xuống đất. Đối với các vật cất cánh từ mặt đất, thiên nhiên thường

* Các phần giải thích khác cần đến Khí động lực học, mà ta sẽ không tìm hiểu ở đây. Khí động lực học chứng tỏ rằng sự tiêu thụ năng lượng và sức cản của cánh với khối lượng và tốc độ bay đã cho, tỷ lệ nghịch với bình phương của sải cánh. Trong các chuyến bay (hạ âm), sải cánh lớn với các cánh thon dài thì có lợi hơn, đặc biệt khi năng lượng khan hiếm.

Có một vấn đề mà ta chỉ nói sơ qua ở đây: tại sao máy bay bay được? Câu trả lời đúng nhất là: *vì nó làm lệch không khí xuống dưới*. Máy bay làm được điều này bằng cách nào? Đó là nhờ các cánh nghiêng, một cánh quạt, các cánh đập hay một cánh cố định. Và khi nào thì một cánh cố định đẩy không khí xuống dưới? Trước hết, nó phải nghiêng đối với luồng không khí; ngoài ra, thiết diện ngang của cánh có thể làm tăng luồng khí thổi xuống. Mối liên hệ giữa hình dạng cánh và luồng khí thổi xuống là một chủ đề quan trọng của Khí động lực học ứng dụng.

** Website www.aniprop.de trình bày một cách tiếp cận điển hình; các site ovirc.free.fr và www.ornithopter.org giới thiệu cách tạo dựng các hệ thống dành cho những người có sở thích thuộc lĩnh vực này.



HÌNH 155 Các thí dụ về 3 loại cánh lớn trong thiên nhiên, tất cả đều được tối ưu hoá cho các dòng khí nhanh: chim kền kền Thổ nhĩ kỳ (Cathartes aura), chim ruồi cổ đỏ (Archilochus colubris) và con chuồn chuồn (© S.L. Brown, Pennsylvania Game Commission/Joe Kosack and nobodythere).

làm cho cánh ở trên lưng của chúng tựa vào nhau sao cho khi vươn ra, áp suất thấp giữa hai cánh sẽ cung cấp lực nâng đầu tiên. Phương pháp này được côn trùng và nhiều loài chim sử dụng bao gồm chim trĩ. Những người trông chim đều biết rằng chim trĩ tạo ra một tiếng 'clap' lớn khi cất cánh. Tiếng clap này do vùng áp suất thấp tạo ra.

Cả hai cách sử dụng cánh và cấu tạo của cánh đều phụ thuộc vào kích thước. Đúng ra có 4 loại cánh trong thiên nhiên.

1. Trước tiên, mọi vật thể bay lớn, như máy bay và chim lớn, bay bằng cánh *cố định*, trừ trường hợp cất cánh và hạ cánh. Loại cánh này được trình bày bên trái của Hình 155.
2. Thứ nhì, chim có kích thước thông thường sử dụng cánh *đập*. (Chim ruồi có thể đập cánh trên 50 lần/s.) Hai loại cánh đầu tiên này có bề dày khoảng từ 10 tới 15 % bề rộng của cánh. Loại cánh này được trình bày giữa Hình 155.
3. Ở kích thước nhỏ hơn, có một loại cánh thứ 3, *cánh màng*. Ta thấy cánh này ở con chuồn chuồn và nhiều côn trùng thông thường. Ở kích cỡ này, số Reynolds khoảng 1000 và nhỏ hơn, cánh *màng* mỏng thì hiệu quả nhất. *Số Reynolds* đo tỷ số giữa tác dụng của lực quán tính và lực nhớt trong lưu chất. Nó được định nghĩa như sau

$$\mathrm{Re} = \frac{l v \rho}{\eta} \tag{111}$$

trong đó l là chiều dài điển hình của hệ, v là tốc độ, ρ là mật độ và η là *độ nhớt* động của lưu chất.* Số Reynolds lớn hơn 1 điển hình cho dòng không khí và dòng nước chảy nhanh. Đúng ra giá trị của số Reynolds phân biệt dòng chảy thành 'nhanh' hay

* Độ nhớt là lực cản của dòng lưu chất. Nó là lực F cần thiết để di chuyển một lớp có bề mặt A trong 1s, song song với một mặt cách nhau một khoảng d; tóm lại, (hệ số) *nhớt động* được định nghĩa là $\eta = d\,F/A\,v$. Đơn vị đo là 1 kg/s m hay 1 Pa s hay 1 N s/m^2, còn được gọi là 10 P hay 10 poise. Nói cách khác, với một ống nằm ngang đã cho, độ nhớt xác định lực bơm cần để bơm chất lỏng đi qua ống với tốc độ đã cho. Độ nhớt của không khí ở 20°C là 1.8×10^{-5} kg/s m hay 18 µPa s và tăng lên theo nhiệt độ. Trái lại, độ nhớt của chất lỏng giảm đi khi nhiệt độ tăng. (Tại sao?) Độ nhớt của nước ở 0°C là 1.8 mPa s, ở 20°C là 1.0 mPa s (hay 1 cP), và ở 40°C là 0.66 mPa s. Hydrogen có độ nhớt nhỏ hơn 10 µPa s, trong khi mật ong là 25 Pa s và hắc ín là 30 MPa s.

Câu đố 140 ny

Các nhà vật lý cũng dùng đại lượng ν gọi là *độ nhớt động học*. Nó được định nghĩa theo mật độ của chất lỏng là $\nu = \eta/\rho$ và đơn vị đo là m^2/s, còn gọi là 10^4 stoke. Độ nhớt động học của nước ở 20°C là 1 mm^2/s (hay 1 cSt). Một trong các giá trị nhỏ nhất là của acetone, 0.3 mm^2/s; glycerine là 2000 mm^2/s. Khí nằm trong khoảng 3 mm^2/s và 100 mm^2/s.



HÌNH 156 Cánh của vài loại côn trùng < 1 mm (thrips, Encarsia, Anagrus, Dicomorpha) (HortNET).

'rối' và dòng chảy 'chậm', 'thành lớp' hay 'nhớt'. Một thí dụ về cánh màng được trình bày phía bên phải của Hình 155. Cả 3 loại cánh đầu tiên này đều được thiết kế cho dòng chảy *rối*.

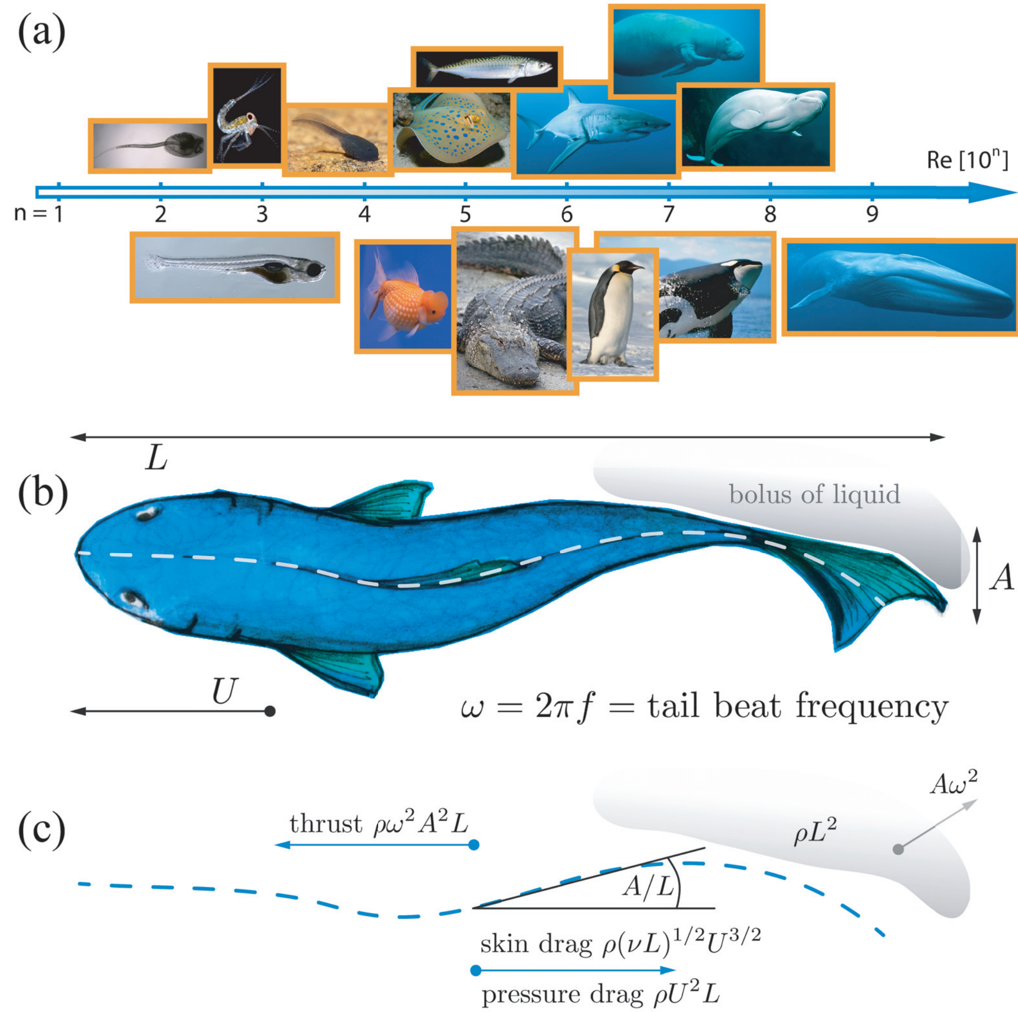
4. Loại cánh thứ 4 được tìm thấy với kích thước khả hữu nhỏ nhất, đối với côn trùng nhỏ hơn 1 mm; cánh của chúng không phải là loại cánh màng nhưng được tối ưu hoá đối với dòng không khí nhớt. Điển hình là trường hợp của bọ trĩ và ong ký sinh, có thể nhỏ khoảng 0.3 mm. Tất cả các côn trùng nhỏ này đều có cánh gồm có một *trụ* trung tâm có lông bao quanh. Đúng ra Hình 156 cho ta thấy rằng một số loài bọ trĩ có cánh trông như một bàn chải toilet thu nhỏ.
5. Ở kích thước nhỏ hơn tương ứng với số Reynolds < 10, thiên nhiên không sử dụng cánh nữa, mặc dù vật vẫn sử dụng cách vận chuyển bằng không khí. Về mặt nguyên tắc, trường hợp số Reynolds nhỏ nhất, trọng lực không còn quan trọng nữa và quá trình bay hợp nhất với việc bơi. Tuy vậy, dòng không khí rất mạnh so với tốc độ mà các hệ nhỏ như vậy thực hiện. Không có việc đạo hàng chủ động nữa. Ở những kích thước nhỏ như vậy, quan trọng đối với sự vận chuyển của bào tử và phấn hoa trong không khí, thiên nhiên sử dụng các dòng không khí để vận chuyển thụ động, tận dụng các hình dạng đặc biệt nhưng cố định.

Tóm lại: bay chủ động chỉ có thể diễn ra khi hình dạng thay đổi. Chỉ có 2 loại cánh thay
Xem 230 đổi hình dạng để bay chủ động: cánh và cánh quạt (bao gồm turbine). Các kỹ sư đang miệt mài nghiên cứu cách thức thay đổi hình dạng cánh để làm cho việc bay trở nên hữu
Xem 231 hiệu nhất. Điều thú vị là bơi lội đã đặt ra một thách thức tương tự.

Bơi lội

Bơi lội là một hiện tượng hấp dẫn. Người Hy Lạp cho rằng khả năng bơi của cá là bằng chứng cho thấy nước được các nguyên tử tạo thành. Nếu nguyên tử không hiện hữu, cá không thể bơi xuyên qua nước. Thật vậy, bơi là một hoạt động chứng tỏ rằng vật chất không thể liên tục. Nghiên cứu hiện tượng bơi sẽ minh giải cho điều này. Nhưng nói chính xác thì cá bơi như thế nào?

Khi cá heo, sứa, tàu ngầm hay người *bơi*, các đối tượng này đã quạt nước bằng vây, cơ thể, chân vịt, tay chân về phía sau. Do định luật bảo toàn động lượng tất cả chuyển động



HÌNH 157 Một số động vật sử dụng cách bơi theo kiểu sóng và các biến chính mô tả cách bơi đó. (© L. Mahadevan/Macmillan)

Xem 232

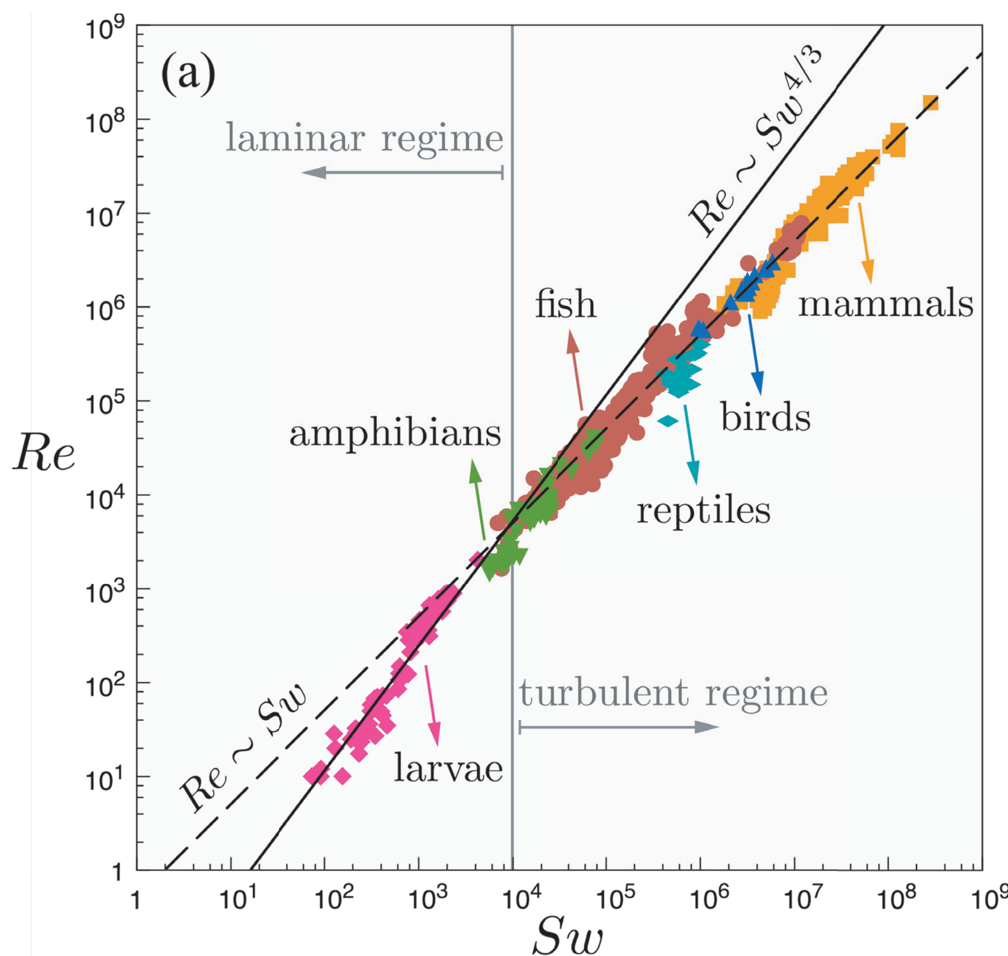
về phía trước.*

Phần lớn cá và động vật hữu nhũ sống dưới nước bơi bằng cách uốn cơ thể và thay đổi luân phiên giữa 2 hình thức biến dạng. Một tổng quan về các động vật sử dụng kiểu bơi này – các nhà chuyên môn gọi nó là *uốn lượn* – được trình bày trong Hình 157. Đối với những kiểu bơi như vậy, số Reynolds tuân theo hệ thức Re = $vL/\nu >> 1$; ở đây v là tốc độ bơi, L là chiều dài cơ thể và ν là độ nhớt động học. Phạm vi của số Reynolds đo được từ các sinh vật bơi được biểu diễn trong đồ thị. Chuyển động bơi được mô tả tốt nhất bằng số bơi Sw = $\omega AL/\nu$, trong đó ω và A là tần số góc và biên độ. Đồ thị kế tiếp, Hình 158, cho ta thấy đối với sự bơi nhanh, tốc độ bơi v gần như chỉ phụ thuộc vào biên

Xem 232

Quyển I, trang 90

* Cá không dùng chân vịt, vì các luận cứ chống lại bánh xe mà ta đã thu thập lúc đầu cuộc hành trình không áp dụng cho việc bơi. Chân vịt có mạch máu sẽ là một điểm yếu trong cấu tạo làm cho cá dễ bị tấn công. Do đó thiên nhiên không phát triển loài cá có chân vịt.



Xem 232
HÌNH 158 Bơi theo kiểu sóng tuân theo các quy luật tỷ lệ đơn giản đối với cơ thể có chiều dài trong khoảng vài mm tới 30 m. Số Reynolds Re mô tả tỷ số giữa tác dụng quán tính (nước được ném về phía sau) và tác dụng tiêu tán (ma sát của nước). Số bơi Sw mô tả động học của cơ thể. (© L. Mahadevan/Macmillan)

độ và tần số của chuyển động sóng; đối với cơ thể nhỏ hơn thì bơi trong chế độ chậm, tốc độ bơi cũng phụ thuộc chiều dài của cơ thể.

Tóm lại, cá, cá heo, tàu ngầm và người bơi cùng một cách giống như pháo hoa và hoả tiễn bay: ném vật chất về phía sau, thông qua lực nâng. Lực đẩy dựa vào lực nâng là kiểu bơi vĩ mô chính. Có phải mọi sinh vật bơi cùng một kiểu hay không? Không. Nhiều sinh vật bơi bằng các ống phản lực đẩy nước, thí dụ như con mực. Và điều quan trọng là các sinh vật *nhỏ* bơi xuyên qua các phân tử chất lỏng sử dụng một cách bơi *vi mô* hoàn toàn khác.

Xem 234

Các sinh vật nhỏ như vi khuẩn *không* có khả năng đẩy hay gia tốc nước chung quanh chúng. Thật vậy, nước bám quanh và không tách rời với các vi sinh vật. Nói theo ngôn ngữ vật lý, trong trường hợp này, động năng của nước không đáng kể. Để bơi được, sinh vật đơn bào cần sử dụng một hiệu ứng khác. Đúng ra khả năng duy nhất của chúng



HÌNH 159 Một con điệp đang bơi (here from the genus Chlamys) (© Dave Colwell).

là thay đổi hình dạng có kiểm soát. Nhìn từ xa, việc bơi của các vi sinh vật giống như chuyển động của các hạt xuyên qua chân không: vì giống như vi sinh vật, các hạt cũng không có gì để ném ra phía sau. *

Cách tốt nhất để phân biệt cách bơi vĩ mô và vi mô là nhìn vào con điệp. *Điệp* là động vật thân mềm kích thước cỡ vài cm như ta thấy trong Hình 159. Điệp có một vỏ đôi nối với nhau bằng 1 khớp nối có thể mở đóng được. Nếu chúng đóng *nhanh*, nước được đẩy ra và con vật được gia tốc; điệp có thể lướt đi trong nước. Sau đó nó lại mở vỏ ra, lần này thì *chậm rãi* và lặp lại ngón nghề này. Khi bơi, những con điệp lớn trông giống như hàm răng giả hình đồng hồ. Điệp sử dụng quá trình bơi vĩ mô.

Nếu ta giảm kích thước của điệp đi 1000 lần thành kích thước của tế bào ta sẽ được một kết quả đơn giản: một con điệp nhỏ như vậy *không* bơi được. Việc các phương pháp bơi không có tính điều chỉnh được bắt nguồn từ tỷ số biến đổi giữa tác dụng quán tính và tác dụng tiêu tán ở những kích cỡ khác nhau. Tỷ số này được đo bởi *số Reynolds Re*.
Quyển I, trang 428 Đối với điệp, số Reynolds, được định nghĩa là $Re = vL/\eta$, trong đó v là tốc độ tương đối giữa vật bơi và nước, L chiều dài của vật bơi, η là *độ nhớt động học* của nước, khoảng $1\ \mathrm{mm}^2/\mathrm{s}$.

Đối với điệp, số Reynolds khoảng 100, chứng tỏ rằng khi nó bơi, tác dụng quán tính quan trọng hơn tác dụng tiêu tán, tức lực ma sát nhớt. Đối với vi khuẩn số Reynolds < 1 nên tác dụng quán tính không quan trọng. Không thể đẩy mạnh nước *ra khỏi* một con điệp có kích thước vi khuẩn và như vậy nó không trượt đi được. Vi khuẩn *không thể* bơi như điệp hay người; vi khuẩn không thể ném nước ra phía sau chúng. Và đây không phải là vấn đề duy nhất mà vi sinh vật gặp phải khi chúng muốn bơi.

Một định lý toán học nổi tiếng phát biểu rằng không có sinh vật có kích thước cỡ tế bào có thể chuyển động được nếu sự thay đổi hình dạng trong hai nửa chuyển động
Xem 233 giống nhau, tức là khi việc mở và đóng chỉ là sự đảo ngược của nhau. Sự thay đổi hình dạng như vậy chỉ có thể làm cho nó chuyển động tới lui. Một định lý toán học khác, *định lý con điệp* phát biểu rằng không có hệ vi mô nào có thể bơi được nếu nó sử dụng các phần có thể chuyển động chỉ với *một* bậc tự do. Như vậy ở kích thước cỡ tế bào, không thể chuyển động bằng cách sử dụng phương pháp mà điệp đã sử dụng ở kích cỡ cm.

* Có một ngoại lệ: vi khuẩn trượt đi bằng cách tiết ra nhớt, mặc dù người ta vẫn chưa rõ tại sao điều này lại dẫn đến chuyển động.

Để bơi thì vi sinh vật cần sử dụng một *chuyển động 2 chiều* rắc rối hơn. Thật vậy, các nhà sinh vật đã nhận thấy rằng mọi vi sinh vật đều sử dụng một trong 4 kiểu bơi sau đây:

1. Vi sinh vật có hình dạng thu gọn với đường kính trong khoảng từ 20 µm tới 20 mm, sử dụng các *tiêm mao*. Tiêm mao là hàng trăm sợi lông nhỏ trên bề mặt sinh vật. Một số sinh vật có thân phủ tiêm mao, một số chỉ có một phần tiêm mao trên cơ thể. Các sinh vật này chuyển động các tiêm mao làm sinh ra các sóng xung quanh chúng và các sóng mặt này làm cho chúng tiến lên trong chất lỏng. Mọi trẻ em đều thích thú khi nhìn thấy *trùng cỏ*, động vật đơn bào, qua kính hiển vi, khi chúng quan sát nước có thả một ít cỏ trong vài giờ. *Trùng cỏ*, kích thước trong khoảng từ 100 µm tới 300 µm, cũng như nhiều loài phiêu sinh vật khác * sử dụng tiêm mao để di chuyển. Người ta có thể nhìn thấy rõ tiêm mao và chuyển động của nó qua kính hiển vi. Một phương pháp bơi tương tự còn được một số động vật lớn hơn sử dụng; bạn có thể thấy những sóng tương tự bên thân mình của cá mực; ngay cả chuyển động của cá đuối cũng (phần nào) thuộc về loại này. Chuyển động bằng tiêm mao là một cách Xem 235 hiệu quả để thay đổi hình dạng hai chiều của cơ thể và tránh được định lý con điệp.
2. Tinh trùng và vi sinh vật nhân thực, có kích thước trong khoảng từ 1 µm tới 50 µm sử dụng tiên mao (của sinh vật nhân thực) để bơi.** Tiên mao, tiếng Latin có nghĩa là 'cái roi nhỏ', hoạt động như một mái chèo mềm dẻo. Mặc dù chuyển động của chúng đôi khi chỉ là các dao động, tiên mao kiếm được một lực đẩy chỉ trong một nửa chuyển động, thí dụ như trong mỗi lần quạt qua trái. Tiên mao được các tế bào sử dụng như một mái chèo thu nhỏ. Một số tế bào uốn éo tiên mao giống như người ta quay cánh tay. Một số vi sinh vật như tảo *Chlamydomonas*, có 2 tiên mao chuyển Xem 237 động giống như người chuyển động 2 chân khi bơi ếch. Phần lớn các tế bào có thể Xem 238 đổi chiều vẩy tiên mao để có thể chuyển động tiến hay lùi. Nhờ uốn éo mái chèo, tiên mao của vi khuẩn sẽ tránh đi lại con đường cũ khi tiến hay lùi. Kết quả là vi khuẩn né được định lý con điệp và điều khiển được việc bơi mặc dù có thân hình nhỏ bé. Chuyển động của mái chèo mềm mại là một thí dụ về cơ cấu phi-đoạn nhiệt; một phần năng lượng quan trọng sẽ bị tiêu tán.
3. Vi sinh vật bơi nhỏ nhất, vi khuẩn với kích thước từ 0.2 µm tới 5 µm, bơi bằng tiên Xem 239 mao *vi khuẩn*. Các tiên mao này còn được gọi là tiên mao của sinh vật nhân sơ, khác với loại vừa để cập. Tiên mao vi khuẩn chuyển động giống chuyển động của cái mở nút chai. Chúng được vi khuẩn *Escherichia coli* nổi tiếng và các vi khuẩn thuộc chi *Salmonella* sử dụng. Kiểu chuyển động này là một trong các ngoại lệ nổi bật về sự không hiện hữu của bánh xe trong thiên nhiên; ta đã nói đến nó khi bắt đầu cuộc Quyển I, trang 90 hành trình. Chuyển động mở nút chai là một thí dụ về cơ cấu đoạn nhiệt.

   Một vi khuẩn Coli điển hình có một nắm tiên mao, mỗi cái dây khoảng 30 nm hình cái mở nút chai có tới 6 vòng; các vòng này có 'bước sóng' 2.3 µm. Mỗi tiên mao được quay bằng một động cơ quay phức tạp có sẵn trong tế bào, sao cho tế bào có thể kiểm soát được hướng quay lẫn vận tốc góc. Đối với vi khuẩn Coli, tần số nằm Xem 240 trong khoảng từ 0 tới 300 Hz.

* Hãy xem trang www.liv.ac.uk/ciliate để có một tổng quan.

Xem 236 ** Tinh trùng lớn nhất, dài 6 cm, được ruồi *Drosophila bifurca* kích thước 1.5 mm sinh ra có họ hàng với *ruồi giấm* nổi tiếng.

Một tiên mao quay không đẩy vi khuẩn giống như một chân vịt; như đã để cập, các vận tốc liên quan rất nhỏ, số Reynolds chỉ vào khoảng 10^{-4}. Ở kích thước và vận tốc này, việc mô tả tác dụng bằng chuyển động quay của cái mở nút chai trong mật hay trong nút chai thì phù hợp hơn: một cái mở nút chai quay sẽ sinh ra một chuyển động ngược với vật chất xung quanh theo hướng trục của nó. Tiên mao di chuyển vi khuẩn bằng một cách giống như cái mở nút chai chuyển động tay quay đối với nút chai.

4. Có một nhóm vi khuẩn, xoắn khuẩn, chuyển động toàn thân như một cái mở nút chai xuyên qua nước. Thí dụ như *Rhodospirillum rubrum*, có chuyển động mà bạn có thể xem trong video trên trang www.microbiologybytes.com/video/motility.com. Các vi khuẩn này có một nội động cơ quay tròn một sợi nhỏ dọc theo trục làm thay đổi hình dạng tế bào một cách không đối xứng tạo thành chuyển động mở nút chai. Một loại Xem 241 vi khuẩn khác là *Spiroplasma*, vi khuẩn xoắn ốc – nhưng không phải là xoắn khuẩn – thay đổi hình dạng của tế bào, cũng theo cách không đối xứng, bằng cách truyền những cặp chỗ xoắn dọc theo bề mặt cơ thể. Nhiều loài vi sinh vật khác chuyển động bằng cách thay đổi hình dạng cơ thể của chúng.

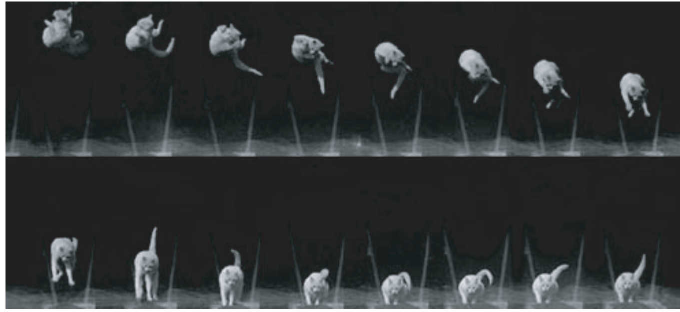
Để kiểm tra khả năng trực giác, bạn hãy thử sức với vài câu đố sau đây: có sự bơi vi mô Câu đố 141 s trong không gian 2 chiều không? 4 chiều?

Cũng cần nói thêm là có những vi khuẩn nhỏ hơn hoàn toàn không bơi. Thật vậy, mỗi vi khuẩn đều cần một tốc độ bơi tối thiểu: nó phải khuếch tán nhanh ra ngoài chất Xem 242 lỏng mà nó đang sống. Khả năng bơi chậm trở nên vô ích; do đó nhiều vi sinh vật hoàn toàn không vận động hay bơi. Một số vi sinh vật được chuyên biệt hoá để chuyển động theo mặt tiếp xúc lỏng–khí. Đúng ra có nhiều kiểu bơi theo mặt tiếp xúc, bao gồm cả các kiểu vĩ mô nhưng ta không để cập ở đây. Các vi sinh vật khác bám vào các vật rắn mà chúng tìm thấy trong chất lỏng. Một số còn có thể *di chuyển* cùng với vật này. A-míp là một thí dụ về vi sinh vật chuyển động theo cách này. Cũng có những kết cấu chuyển động chủ động nhỏ nhất, cụ thể là chuyển động của các phân tử trong bắp thịt và trong Trang 21 màng tế bào, hoạt động theo cách này.

Chúng ta hãy tóm tắt những điều đã trình bày. Mọi chuyển động chủ động mà ta đã biết hay sự tự di chuyển, (trong không gian phẳng) xảy ra trong lưu chất – không khí hay chất lỏng. Mọi chuyển động chủ động đòi hỏi hình dạng thay đổi. Bơi vĩ mô hoạt động nhờ gia tốc lưu chất theo hướng ngược với hướng chuyển động. Bơi vi mô hoạt động nhờ sự biến dạng một cách thông minh khiến cho vật bơi tiến lên trong lưu chất. Để sự thay đổi hình dạng sinh ra chuyển động, môi trường, như lưu chất, phải có nhiều thành phần chuyển động luôn luôn đẩy vào vật bơi. Lúc đó chuyển động của vật bơi mới có thể sinh ra nhờ sự thay đổi hình dạng của vật. Toán học về sự bơi nhờ sự biến dạng khá thú vị; nó đáng để ta bỏ công tìm hiểu.

Chuyển động quay, mèo rơi và lý thuyết về sự thay đổi hình dạng

Ở kích cỡ nhỏ, việc bay và bơi xảy ra nhờ sự thay đổi hình dạng. Trong thập niên vừa qua, việc mô tả sự thay đổi hình dạng đã chuyển từ lĩnh vực nghiên cứu thời thượng sang một chủ đề đem lại những kết quả thú vị và hữu ích. Có nhiều nghiên cứu, thực nghiệm lẫn lý thuyết, về phương thức chính xác mà các vật nhỏ chuyển động trong lưu chất, hiệu quả đạt được...



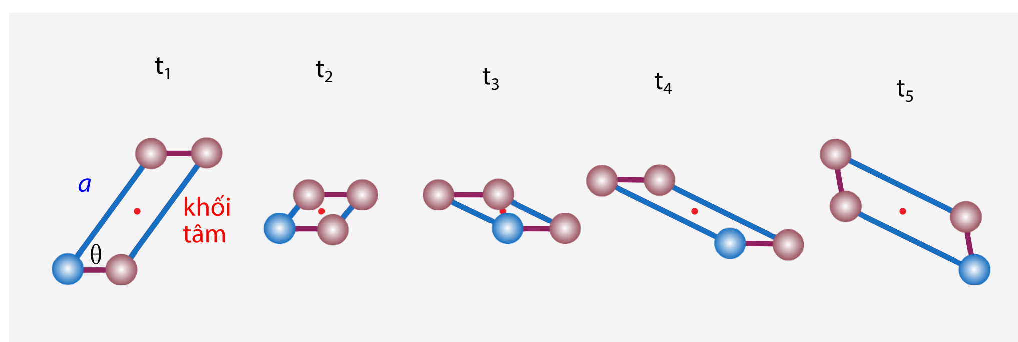
HÌNH 160 Mèo có thể quay người ngay cả khi không có moment động lượng ban đầu (photographs by Etienne-Jules Marey, 1894).



HÌNH 161 Người có thể quay trong không khí giống như mèo: hãy quan sát chuyển động quay ngang thứ nhì của Artem Silchenko, tại Kỳ thi vô địch thế giới môn lao xuống vực năm 2006 (© World High Diving Federation).

Sự thay đổi hình dạng có tổ chức sẽ dẫn tới *chuyển động tĩnh tiến*. A-míp, giun đất, ấu trùng bướm, rắn và ngay cả con người cũng chuyển động nhờ sự thay đổi hình dạng.

Nhưng sự thay đổi hình dạng cũng có thể *làm quay* cơ thể. Trong trường hợp này, lý thuyết không bị ràng buộc vào hệ vi mô mà có thể áp dụng cho mọi kích cỡ. Đặc biệt, lý thuyết thay đổi hình dạng rất hữu ích trong việc giải thích cách mà một con mèo rơi vận động để luôn luôn tiếp đất bằng chân. Đây không là một khả năng bẩm sinh; mèo phải học nó. Nhưng kỳ công này đã hấp dẫn con người trong nhiều thế kỷ như ta thấy trong một tấm hình cũ, Hình 160. Đúng ra mèo khẳng định trong không gian 3 chiều những



HÌNH 162 Con mèo vuông (tứ giác): trong không gian tự do hay trên băng không ma sát, một vật biến dạng được, hình bình hành, làm bằng 4 quả cầu nhỏ và 4 thanh có thể thay đổi góc cơ thể θ và chiều dài 2 thanh a, thì có thể tự quay quanh khối tâm mà không cần sự trợ giúp của bên ngoài. Một khối và 2 thanh có chiều dài thay đổi, được tô màu để minh hoạ chuyển động.

Quyển I, trang 122 điều ta đã biết trong không gian 2 chiều:

▷ Một vật biến dạng được có thể đổi hướng của nó trong không gian mà *không cần* sự trợ giúp ở bên ngoài.

Điều này khác hẳn với chuyển động tĩnh tiến luôn cần sự trợ giúp bên ngoài. Archimedes đã nói một câu nổi tiếng: hãy cho tôi một điểm tựa, tôi sẽ di chuyển cả Trái đất. Nhưng để *quay* Trái đất, *không cần* tựa vào đâu cả!

Không chỉ có mèo, con người cũng lập được kỳ công này: chỉ cần nhìn hình quay ngang thứ nhì của vận động viên trong Hình 161. Phi hành gia trong các trạm không gian và hành khách trong các chuyến bay parabol 'không trọng lực' thường xuyên thực hiện việc này, khi có nhiều vệ tinh nhân tạo được gởi vào không gian.

Trong thập niên 1980, công trình của Berry, Wilczek, Zee và Shapere đã chứng tỏ rằng mọi chuyển động bắt nguồn từ sự thay đổi hình dạng đều được mô tả bằng một lý thuyết Xem 243 chuẩn. Sự tương đương giữa hai bên được trình bày chi tiết trong Bảng 24. Một thí dụ Xem 244 đơn giản và đẹp đẽ cho ý tưởng này đã được Putterman và Raz trình bày và minh hoạ trong Hình 162. Hãy tưởng tượng 4 quả cầu trên băng không ma sát, có cùng khối lượng và kích thước, nối với nhau bằng 4 thanh thẳng, tạo thành 1 hình bình hành. Hãy tưởng tượng thêm là hình bình hành này, có lắp sẵn động cơ nên có thể thay đổi chiều dài dọc theo một cạnh gọi là a và góc θ giữa các cạnh. Putterman và Raz gọi hình này là *con mèo vuông*. Hình cho ta thấy rằng con mèo có thể đổi hướng trên băng trong khi trọng tâm vẫn đứng yên. Hình này cũng cho ta thấy rằng sự đổi hướng chỉ xảy ra khi 2 chuyển động mà mèo có thể thực hiện được, sự kéo căng và thay đổi góc, *không* có tính giao hoán. Thứ tự thực hiện các biến dạng quyết định sự thành công của chuyển động quay.

Chuyển động quay của con mèo vuông xảy ra thành từng *kỳ*; để quay nhiều cần lặp lại nhiều kỳ, giống như người bơi. Nếu mèo vuông đang ở trong chất lỏng, nó có thể tự quay – mặc dù nó không thể tiến lên.

Khi mèo tự quay, góc quay trong mỗi kỳ độc lập với tốc độ của kỳ. Ta cũng có trải nghiệm tương tự khi tự quay trên một cái ghế văn phòng bằng cách quay cánh tay trên đầu: góc quay của ghế độc lập với tốc độ quay tay. Chuyển động theo kỳ sẽ dẫn tới một

BẢNG 24 Sự tương đương giữa sự thay đổi hình dạng và lý thuyết chuẩn.

Khái niệm	Sự thay đổi hình dạng	Lý thuyết chuẩn
Hệ thống	vật thể biến dạng được	tổ hợp chất–trường
Bậc tự do chuẩn	bậc tự do để mô tả hướng và vị trí của vật thể	bậc tự do để xác định thế vector
Đại lượng phụ thuộc chuẩn	hướng và vị trí của hình	phase và thế vector
	sự thay đổi hướng và vị trí dọc theo một đường mở	sự thay đổi phase và thế vector dọc theo một đường mở
Phép biến đổi chuẩn	thay đổi hướng và vị trí	thay đổi thế vector
Các đại lượng độc lập với chuẩn	hướng và vị trí sau một toàn kỳ	độ lệch phase trên đường cong đóng, tích phân của thế vector dọc theo một đường cong đóng
	độ biến dạng	cường độ trường
Nhóm chuẩn	thí dụ như phép quay khả hữu SO(3) hay chuyển động E(3)	U(1), SU(2), SU(3)

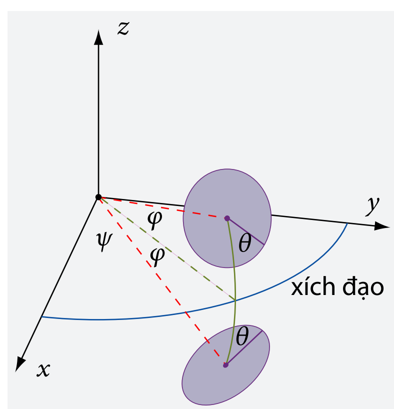
Câu đố 142 d câu hỏi: Trong mỗi kỳ con mèo có thể quay một góc lớn nhất là bao nhiêu?

Quay theo kỳ có nhiều hệ quả quan trọng. Trước tiên, số kỳ là một đại lượng mà mọi quan sát viên đều nhất trí: nó bất biến đối với quan sát viên. Thứ nhì, sự đổi hướng sau một *toàn kỳ* cũng bất biến đối với quan sát viên. Thứ ba, sự đổi hướng đối với những kỳ *chưa hoàn thành* phụ thuộc vào quan sát viên: nó phụ thuộc vào cách định hướng. Thí dụ, nếu hướng được xác định bằng hướng của đường chéo của vật thể đi qua khối cầu đen (xem Hình 162), nó sẽ thay đổi theo một cách nào đó trong 1 kỳ. Nếu hướng được xác định bằng hướng của thanh cố định gắn vào khối cầu đen, nó sẽ thay đổi theo một cách khác. Chỉ sau một toàn kỳ hai trị này mới trùng nhau. Các toán gia nói rằng sự lựa chọn cách xác định tức giá trị của hướng thì *phụ thuộc chuẩn* nhưng sự đổi hướng sau một toàn kỳ thì *bất biến đối với chuẩn*.

Tóm lại, mèo vuông cho ta thấy 3 điều. Một, các vật thể có thể biến dạng một cách đơn giản thì có thể đổi hướng của chúng trong không gian. Hai, hướng của một vật biến dạng được, chỉ có thể thay đổi nếu sự biến dạng *không-giao hoán*. Ba, các vật có thể biến dạng như vậy được mô tả bằng *các lý thuyết chuẩn*: một số tính chất của vật là bất biến chuẩn, các tính chất khác thì phụ thuộc chuẩn. Kết luận này làm phát sinh một câu hỏi: ta có thể sử dụng ý tưởng này để gia tăng sự hiểu biết về lý thuyết chuẩn của tương tác điện từ, yếu và mạnh hay không? Shapere và Wilczek trả lời không. Ta sẽ tìm hiểu vấn đề này trong quyển kế tiếp. Đúng ra sự biến dạng sẽ làm cho ta ngạc nhiên nhiều hơn.

Bơi trong không gian cong

Trong không gian phẳng ta không thể tạo ra chuyển động tĩnh tiến bằng sự thay đổi hình dạng. Chỉ có thể thay đổi hướng. Điều đáng ngạc nhiên là nếu không gian *cong*, thì có thể chuyển động tĩnh tiến. Một thí dụ đơn giản đã được Jack Wisdom công bố năm Xem 245 2003. Ông nhận thấy rằng sự thay đổi hình dạng của vật một cách tuần hoàn có thể tạo ra chuyển động tĩnh tiến, quay hay cả hai.



HÌNH 163 Bơi trên một mặt cong bằng cách sử dụng 2 đĩa.

Thật vậy, ta đã biết từ Vật lý Galilei rằng trên một mặt phẳng không ma sát ta không thể chuyển động được nhưng ta có thể đổi hướng. Điều này đúng đối với mặt phẳng. Trên 1 mặt cong, ta có thể sử dụng khả năng này để quay và biến nó thành chuyển động.

Lấy 2 đĩa nặng đặt nằm trên một mặt không ma sát của một hành tinh hình cầu như trong Hình 163. Hãy xem xét 4 bước sau: 1. độ phân cách đĩa φ tăng lên một góc $\Delta\varphi$, 2. các đĩa quay ngược chiều nhau quanh trọng tâm của chúng một góc $\Delta\theta$, 3. độ phân cách giảm đi $-\Delta\varphi$, và 4. chúng quay ngược lại $-\Delta\theta$. Do định luật bảo toàn moment động lượng, hệ 2 đĩa thay đổi kinh độ 1 góc $\Delta\psi$ bằng

Câu đố 143 ny

$$\Delta\psi = \frac{1}{2}\gamma^2 \Delta\theta\Delta\varphi \,, \tag{112}$$

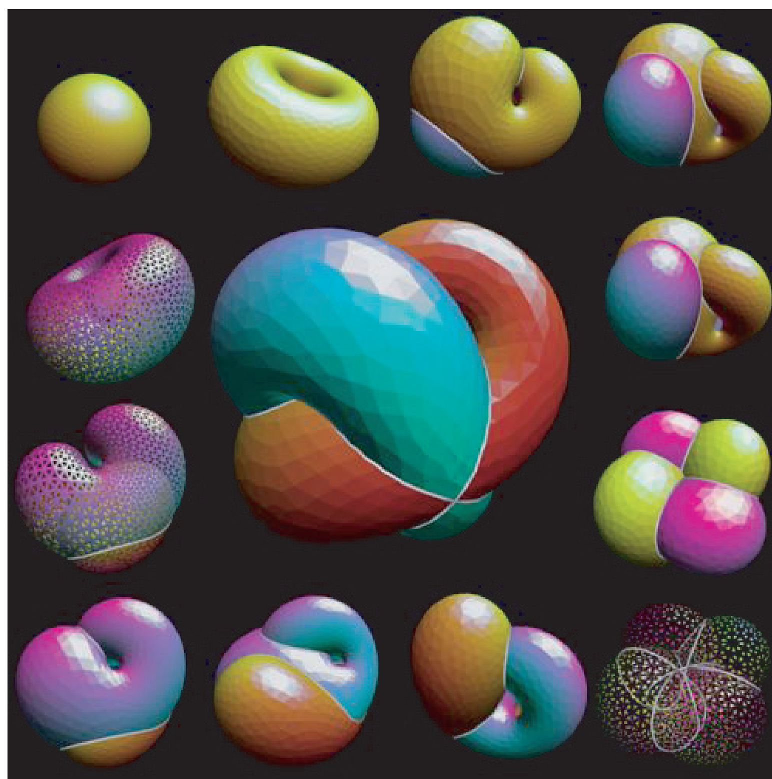
trong đó γ là bán kính góc của đĩa. Chu kỳ này có thể lặp lại mãi và nó cho phép một vật bơi trên bề mặt Trái đất. Không may là đối với một vật có kích thước 1m, chuyển động của mỗi chu kỳ bơi chỉ vào khoảng 10^{-27} m.

Lý luận chứng tỏ rằng phương pháp tương tự cũng áp dụng được trong không gian cong, khi có mặt của lực hấp dẫn. Cơ chế này cho phép một vật đang rơi bơi ra khỏi quỹ đạo rơi tự do. Không may là khoảng cách đạt được đối với một vật thông thường rất nhỏ. Tuy vậy, tác dụng này vẫn có.

Nói cách khác, có một cách bơi qua không gian cong giống như bơi khi số Reynolds nhỏ. Khi đó, chuyển động là kết quả của một sự thay đổi hình dạng đơn giản. Đến đây ta có biết thêm điều gì về sự mô tả chuyển động không? Ta sẽ trả lời câu này vào cuối cuộc hành trình.

Lộn một hình cầu từ trong ra ngoài

> “Một bài văn nên giống như một áo dạ hội của phụ nữ; đủ dài để bao hàm cả chủ đề nhưng phải đủ ngắn để còn giữ được sự hấp dẫn của nó.”
>
> Vô danh



HÌNH 164 Một cách lộn hình cầu từ trong ra ngoài với các giai đoạn trung gian xếp theo chiều kim đồng hồ (© John Sullivan).

Khi tìm hiểu chủ đề về chuyển động của các thực thể linh hoạt, ta không thể bỏ qua một thí dụ nổi tiếng. Năm 1957, toán gia Stephen Smale đã chứng minh rằng một hình cầu có Xem 246 thể lộn từ bên trong ra bên ngoài. Khám phá này mang lại cho ông huy chương Fields năm 1966, giải thưởng cao nhất cho các khám phá thuộc lĩnh vực Toán học. Các toán gia gọi khám phá của ông là *sự lộn trái* hình cầu.

Để hiểu được kết quả này, ta cần mô tả rõ ràng hơn các quy luật lộn trái một hình trong toán học. Trước tiên, ta giả sử rằng hình cầu làm bằng một màng mỏng có khả năng kéo dãn và uốn cong không giới hạn. Thứ hai, màng này được giả sử là có thể *giao cắt* với chính nó. Dĩ nhiên, một vật liệu ma quái như vậy không có trên đời này; nhưng trong toán học thì ta có thể tưởng tượng như vậy. Quy luật thứ 3 là màng này phải biến dạng sao cho nó không bị thủng, rách hay bị gấp lại; tóm lại là mọi việc phải xảy ra *trơn tru* (hay nói theo toán học là một cách khả vi).

Mặc dù Smale đã chứng minh được tính khả thi của sự lộn trái, người đầu tiên tìm ra Xem 247, Xem 248 cách thực hiện việc này lại là một nhà topo mù, Bernard Morin vào năm 1961, dựa theo ý tưởng của Arnold Shapiro. Sau đó, người ta đã khám phá thêm nhiều phương pháp khác.

Xem 249 Hiện nay đã có nhiều video về sự lộn trái hình cầu tạo ra bằng máy tính.* Film nổi tiếng nhất là *Từ trong ra ngoài*, của William P. Thurston, và *Optiverse*, trình bày phương

* Ta có thể xem tóm lược về các video này tại website www.geom.umn.edu/docs/outreach/oi, có cách trình bày có tính sư phạm nhất. Một cách giải thích đơn giản khác được Erik de Neve trình bày trên website www.usefuldreams.org/sphereev.htm. Ta cũng có thể chạy các phần mềm về sự lộn trái ngay ở nhà; hãy ghé

pháp hữu hiệu nhất từ trước tới nay, do nhóm của John Sullivan và cộng sự khám phá như ta thấy trong Hình 164.

Tại sao sự lộn trái hình cầu lại được các nhà vật lý quan tâm? Nếu các hạt sơ cấp được mở rộng đồng thời có dạng hình cầu thì phép lộn trái có thể là nhóm đối xứng của hạt. Để hiểu rõ lý do ta hãy tóm lược các tác dụng của phép lộn trái lên toàn bộ không gian bao quanh chứ không hạn định trong hình cầu. Tác dụng sau cùng của phép lộn trái là phép biến đổi

$$(x, y, z) \rightarrow \frac{(x, y, -z)\, R^2}{r^2} \qquad (113)$$

trong đó R là bán kính của hình cầu và r là chiều dài của vector toạ độ (x, y, z), như vậy $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$. Do dấu trừ trong toạ độ z, phép lộn trái khác với phép nghịch đảo nhưng không khác quá nhiều. Như ta sẽ thấy trong phần cuối cuộc hành trình, một phép biến đổi tương tự phép lộn trái, phép đối ngẫu không-thời gian, là đối xứng cơ bản của thiên nhiên.

Quyển VI, trang 114

Mây

Mây là một lớp các vật linh hoạt quan trọng khác. Việc không có ranh giới xác định làm cho chúng quyến rũ hơn a míp, vi khuẩn hay mèo rơi. Ta có thể quan sát sự đa dạng của mây từ phi cơ.

Mây tích cumulonimbus trêntrời, giống như mọi đám mây khí tượng khác, là hơi nước và các giọt nước. Thiên hà là đám mây các ngôi sao. Sao là đám mây plasma. Khí quyển là đám mây các chất khí. Nguyên tử là đám mây electron. Hạt nhân là đám mây proton và neutron và đến lượt chúng là đám mây quark. So sánh các loại mây khác nhau sẽ làm bạn hiểu rõ vấn đề và cảm thấy thú vị.

Quyển III, trang 217

Tất cả các loại mây đều có thể được mô tả bằng hình dạng và kích thước, mặc dù trên lý thuyết chúng không có ranh giới. Ta có thể xác định hình dạng và kích thước *hiệu dụng* của đám mây bằng một vùng chỉ có mật độ là 1 % mật độ cực đại (hay có thể sử dụng các quy định khác). Mọi đám mây đều có thể được mô tả bằng *mật độ xác suất* của các thành phần tạo nên mây. Mọi đám mây đều *bảo toàn* số cấu tử.

Khi ta thấy mây, ta có thể thắc mắc tại sao nó không suy sụp. Mỗi đám mây là một kết tụ; mọi kết tụ đều được giữ cho không suy sụp bằng *3* cách: nhờ quay, nhờ áp suất, nhờ nguyên lý Pauli tức là lượng tử tác dụng. Thí dụ như thiên hà không suy sụp nhờ quay tròn. Phần lớn ngôi sao, khí quyển và mây mưa không suy sụp nhờ áp suất khí. Sao Neutron, Trái đất, hạt nhân nguyên tử, proton hay mây electron của nguyên tử được giữ cho tách ra nhờ lượng tử tác dụng.

Quyển I, trang 257

Đám mây mưa là một cách giữ hàng ngàn tấn nước treo lơ lửng trong không khí. Bạn có thể giải thích cái gì giữ cho nó nổi và cái gì giữ cho nó không khuếch tán thành các cấu trúc càng ngày càng mỏng không?

Câu đố 144 s

Hai đám mây mưa có thể hợp nhất. Hai đám mây electron cũng vậy. Thiên hà cũng không khác. Nhưng các đám mây nguyên tử có thể *đi cắt* qua nhau. Ta nên nhớ rằng một nguyên tử thông thường có thể nằm trong một nguyên tử Rydberg rồi đi ra ngoai mà không thay đổi gì. Trái lại, mây mưa, sao, thiên hà hay các đám mây vĩ mô khác không

Quyển IV, trang 187

thăm website www.cslub.uwaterloo.ca/~mjmcguff/eversion. Hình 164 được lấy từ website new.math.uiuc.edu/optiverse.



HÌNH 165 Xoáy trong thiên nhiên: vòi rồng (© Zé Nogueira).

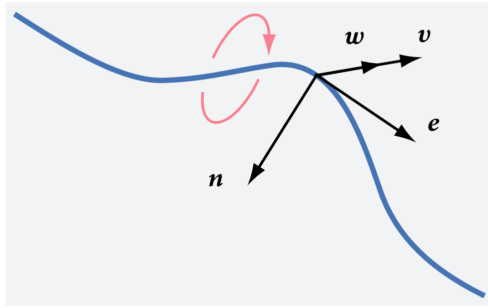
thể cắt qua nhau. Khi các quỹ đạo của chúng giao nhau, chúng chỉ có thể hợp nhất hay bị xé ra thành từng mảnh. Do không thể cắt qua nhau nên chỉ có các đám mây vi mô là có thể đếm được. Trong trường hợp vĩ mô, thực tế không có cách xác định một đám mây 'đơn lẻ'. Nếu cần chính xác hoàn toàn thì ta không thể nói là có nhiều hơn một đám mây vì giữa chúng không có ranh giới rõ ràng. Các đám mây electron thì khác. Sự thật thì trong một mảnh chất rắn ta chỉ có thể nói là có một đám mây electron đơn lẻ trong toàn bộ vật; tuy vậy, khi chia vật ra, thì đám mây này lại bị chia ra khiến cho các đám mây ban đầu tái xuất hiện. Tóm lại ta có thể nói về những đám mây electron 'đơn lẻ'.

Nếu ta muốn chặt chẽ thì thiên hà, sao và mây mưa có thể xem như được tạo thành từ các hạt định xứ. Tính chất mây của chúng chỉ là biểu kiến. Điều này có đúng cho các đám mây electron không? Và không gian thì sao?

Xoáy và phương trình Schrödinger

Động lực học lưu chất là một chủ đề chứa nhiều điều thú vị. Lấy trường hợp *xoáy* mà ta có thể thấy trong một bồn tắm sâu, đang xả nước: nó là một 'vật thể' linh hoạt một chiều, có thể biến dạng và ta có thể nhìn thấy vòng xoáy của nó. Các xoáy lớn hơn như lốc xoáy trên Trái đất và trên các hành tinh khác, như *vòi rồng* và xoáy xuất hiện ở cuối cánh bay hay chân vịt. Các xoáy nhỏ hơn, được lượng tử hoá, xuất hiện trong siêu lưu chất. Một thí dụ được trình bày trong Hình 165; các xoáy lửa và lốc xoáy lửa ngoạn mục mà đôi khi ta có thể gặp, cũng là các xoáy.

Trang 105



HÌNH 166 tiếp tuyến $\boldsymbol{e}$, pháp tuyến $\boldsymbol{n}$, độ xoắn $\boldsymbol{w}$ và vận tốc $\boldsymbol{v}$ của một xoáy trong lưu chất đang quay tròn, trực giao với nhau.

Xoáy, còn gọi là *ống xoáy* hay *dây xoáy* là các thực thể linh hoạt. Một kết quả đẹp đẽ có từ thập niên 1960 là một dây xoáy trong một chất lỏng quay tròn được mô tả bằng phương trình Schrödinger một chiều. Ta hãy xem cách thực hiện điều này. Xem 250

Một xoáy tuyến tính có thể biến dạng được, như đã minh hoạ trong Hình 166, được mô tả bằng một tập hợp liên tục các vector vị trí $\boldsymbol{r}(t,s)$ phụ thuộc vào thời gian t và một tham số s. Tham số s đặc trưng cho vị trí tương đối dọc theo xoáy. Ở mỗi điểm trên xoáy, có một vector tiếp tuyến đơn vị $\boldsymbol{e}(t,s)$, một vector độ cong pháp tuyến đơn vị $\boldsymbol{n}(t,s)$ và một vector độ xoắn đơn vị $\boldsymbol{w}(t,s)$. Ba vector này, như ta thấy trong Hình 166, được xác định như thường lệ

$$\begin{aligned}\boldsymbol{e} &= \frac{\partial \boldsymbol{r}}{\partial s} ,\\ \kappa\boldsymbol{n} &= \frac{\partial \boldsymbol{e}}{\partial s} ,\\ \tau\boldsymbol{w} &= -\frac{\partial(\boldsymbol{e}\times\boldsymbol{n})}{\partial s} ,\end{aligned} \tag{114}$$

trong đó κ đặc trưng cho độ cong và τ đặc trưng cho độ xoắn. Nói chung, cả 2 số đều phụ thuộc vào thời gian và vị trí trên đường cong.

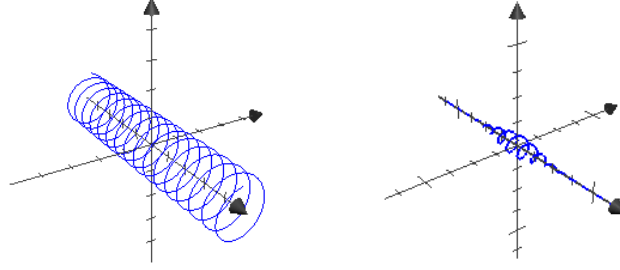
Trong trường hợp đơn giản nhất, môi trường quay gây ra một vận tốc địa phương $\boldsymbol{v}$ đối với xoáy, tỷ lệ với độ cong κ, trực giao với vector tiếp tuyến $\boldsymbol{e}$ và vector độ cong pháp tuyến $\boldsymbol{n}$:

$$\boldsymbol{v} = \eta\kappa(\boldsymbol{e}\times\boldsymbol{n}) , \tag{115}$$

Xem 250 trong đó η được gọi là *hệ số tự cảm địa phương*, mô tả sự liên kết giữa chất lỏng và chuyển động xoáy. Đây là phương trình tiến hoá của xoáy.

Bây giờ ta giả sử rằng xoáy chỉ biến dạng *một chút* từ cấu hình thẳng. Về mặt kỹ thuật, ta ở trong chế độ *tuyến tính*. Đối với một xoáy tuyến tính như vậy, ta có thể viết trực tiếp từ toạ độ x

$$\boldsymbol{r} = (x, y(x,t), z(x,t)) . \tag{116}$$



HÌNH 167 Chuyển động của một xoáy: lời giải xoắn ốc cơ bản và một 'gói sóng' xoắn đang chuyển động.

Vì biến dạng nhỏ nên $\partial s \approx \partial x$ và do đó

$$\begin{aligned} \boldsymbol{e} &= (1, \frac{\partial y}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial x}) \approx (1,0,0) \,, \\ \kappa \boldsymbol{n} &\approx (0, \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}) \,, \text{ và} \\ \boldsymbol{v} &= (0, \frac{\partial y}{\partial t}, \frac{\partial z}{\partial t}) \,. \end{aligned} \tag{117}$$

Như vậy ta có thể viết lại phương trình tiến hoá (115) như sau

$$(0, \frac{\partial y}{\partial t}, \frac{\partial z}{\partial t}) = \eta \, (0, -\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}) \,. \tag{118}$$

Phương trình này khá nổi tiếng; nếu ta bỏ toạ độ đầu tiên và đưa số phức vào bằng cách đặt $\Phi = y + iz$, ta có thể viết lại phương trình như sau

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = i\eta \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} \,. \tag{119}$$

Đây là phương trình Schrödinger một chiều đối với sự tiến hoá của một hàm sóng tự do! Hàm phức Φ đặc trưng cho biến dạng ngang của xoáy. Nói cách khác, ta có thể nói rằng phương trình Schrödinger một chiều mô tả sự tiến hoá của biến dạng đối với một xoáy gần như tuyến tính trong chất lỏng quay tròn. Ta cần nhớ rằng không có hằng số $\hbar$ trong phương trình này vì ta đang khảo sát một hệ *cổ điển*.

Xem 251

Phương trình Schrödinger tuyến tính dưới dạng Φ. Do đó lời giải cơ bản là

$$\Phi(x, y, z, t) = a\, e^{i(\tau x - \omega t)} \quad \text{với} \quad \omega = \eta\tau^2 \quad \text{và} \quad \kappa = a\tau^2 \, . \tag{120}$$

Biên độ a và bước sóng $b = 1/\tau$ có thể được chọn một cách tự do, miễn là điều kiện gần đúng của độ lệch nhỏ được đáp ứng; điều kiện này có thể diễn giải thành $a \ll b$.* Theo cách diễn tả hiện nay, lời giải cơ bản tương ứng với một đường xoáy biến dạng thành một *helix*, như ta thấy trong Hình 167. Tốc độ góc ω là tốc độ quay quanh trục của helix.

Câu đố 145 ny

Helix chuyển động dọc theo trục với tốc độ

$$v_{\text{helix dọc}} = 2\eta\tau \, . \tag{121}$$

Nói cách khác, đối với các thực thể linh hoạt, theo phương trình tiến hoá (115), chuyển động quay và tĩnh tiến liên kết với nhau.** Động lượng p có thể xác định được nhờ sử dụng $\partial\Phi/\partial x$, dẫn tới kết quả

$$p = \tau = \frac{1}{b} \, . \tag{122}$$

Như vậy động lượng tỷ lệ nghịch với bước sóng hay bước của helix như ta mong đợi. Năng lượng E được xác định nhờ sử dụng $\partial\Phi/\partial t$, cho ta kết quả là

$$E = \eta\tau^2 = \frac{\eta}{b^2} \, . \tag{123}$$

Năng lượng và động lượng kết nối với nhau theo hệ thức

$$E = \frac{p^2}{2\mu} \quad \text{trong đó} \quad \mu = \frac{1}{2\eta} \, . \tag{124}$$

Trang 295

Nói cách khác, một xoáy với hệ số η – mô tả sự liên kết giữa môi trường và xoáy – nên được mô tả bằng một con số μ có tác dụng như khối lượng hiệu dụng. Ta cũng có thể định nghĩa một đại lượng (thực) $|\Phi| = a$ mô tả *biên độ* của sự biến dạng.

Trong phương trình Schrödinger (119), đạo hàm thứ nhì hàm ý rằng 'gói sóng' biến dạng có khuynh hướng trải rộng trong không gian. Bạn có thể chứng tỏ rằng mối liên hệ bước sóng–tần số đối với một nhóm sóng xoáy sẽ dẫn tới điều gì đó giống như hệ thức bất định (nhưng không có $\hbar$ xuất hiện tường minh) hay không?

Tóm lại, biên độ phức Φ đối với một xoáy tuyến tính trong một chất lỏng quay tròn hành xử như một hàm sóng một chiều của một hạt tự do phi tương đối tính. Ngoài ra, người ta có đưa ra lý do số phức xuất hiện trong phương trình Schrödinger của Thuyết lượng tử: chúng có thể bắt nguồn từ chuyển động quay riêng của giá thể nền tảng. Điều này có đúng không? Ta sẽ tìm ra câu trả lời trong phần cuối cuộc hành trình.

Quyển VI, trang 174

Câu đố 146 ny

* Độ cong là $\kappa = a/b^2$, độ xoắn là $\tau = 1/b$. Thay vì $a \ll b$ ta có thể viết $\kappa \ll \tau$.

** Gói sóng chuyển động dọc theo trục với tốc độ $v_{\text{packet}} = 2\eta\tau_0$, trong đó τ_0 là độ xoắn của helix của bước sóng trung tâm.

KHÔNG-THỜI GIAN LINH HOẠT

Thuyết tương đối tổng quát chứng tỏ rằng không gian có thể chuyển động và dao động: không gian là một thực thể linh hoạt. Không gian có giống như mây, lưu chất hay chất rắn không?

Một tiếp cận hấp dẫn với không-thời gian giống như một lưu chất đã được Ted Jacobson công bố năm 1995. Ông đã tìm hiểu những điều đã xảy ra nếu không-thời gian, thay vì liên tục, thì lại là trung bình thống kê của nhiều thành phần chuyển động trong trạng thái mất trật tự. Xem 252

Mô tả chuẩn của Thuyết tương đối tổng quát về không-thời gian là một thực thể tương tự như một tấm nệm đàn hồi. Jacobson đã nghiên cứu những điều xảy ra khi ta giả sử tấm nệm được làm bằng lưu chất. Lưu chất là một tập hợp các thành phần (không xác định) chuyển động ngẫu nhiên và được mô tả bằng một nhiệt độ thay đổi từ điểm này sang điểm khác. Quyển II, trang 147

Jacobson khởi đầu từ hiệu ứng Fulling–Davies–Unruh và giả sử rằng nhiệt độ địa phương của lưu chất là bội số của gia tốc hấp dẫn địa phương. Ông cũng sử dụng tính tỷ lệ – đúng trên các chân trời – giữa diện tích và entropy. Vì năng lượng chảy xuyên qua chân trời có thể gọi là nhiệt, nên ta có thể chuyển biểu thức $\delta Q = T\delta S$ thành $\delta E = a\delta A(c^2/4G)$, mô tả hành trạng của không-thời gian ở chân trời. Như ta đã thấy, biểu thức này hoàn toàn tương đương với Thuyết tương đối tổng quát. Trang 129 Quyển VI, trang 33

Nói cách khác, việc tưởng tượng không-thời gian là lưu chất là một phép loại suy hữu hiệu cho phép ta suy ra Thuyết tương đối tổng quát. Điều này có mang ý nghĩa không-thời gian thực sự *giống như* lưu chất hay không? Cho đến nay, phép loại suy không đủ để trả lời cho câu hỏi này và ta phải chờ đến cuối cuộc hành trình để giải quyết nó. Đúng ra có một lập luận cũ nói ngược lại nhưng nó chỉ làm ta rối trí thêm mà thôi.

SỰ LỆCH MẠNG VÀ KHÔNG-THỜI GIAN RẮN

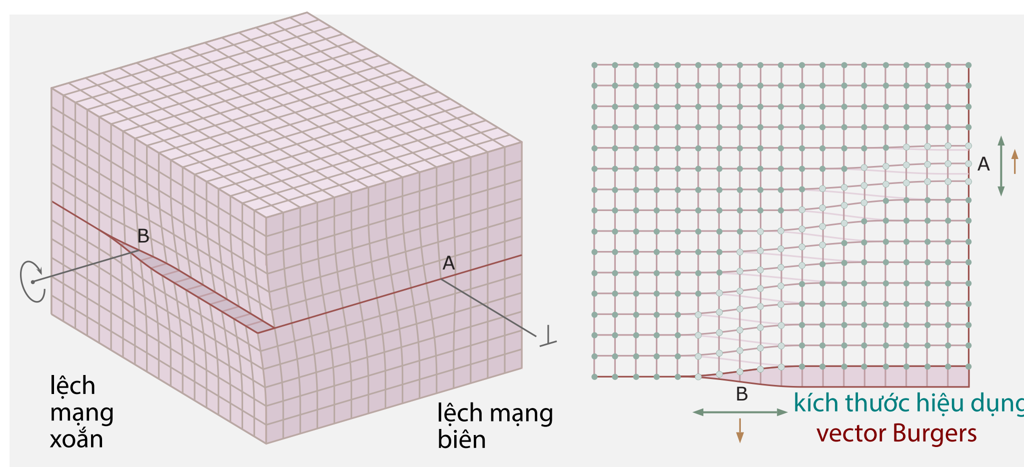
Thuyết tương đối tổng quát cho chúng ta biết rằng không gian hành xử như một tấm nệm biến dạng được; như vậy không gian hành xử như chất rắn. Có một lập luận thứ nhì ủng hộ quan điểm này và tạo ra một sự hấp dẫn không ngừng. Lập luận này liên hệ với một tính chất của các chuyển động lệch mạng.

Lệch mạng là các lỗi cấu trúc 1 chiều trong tinh thể như ta thấy trong Hình 168. Một lệch mạng tổng quát là sự pha trộn của 2 kiểu lệch mạng thuần tuý : *lệch mạng biên* và *lệch mạng xoắn*. Cả hai đều được trình bày trong Hình 168.

Nếu ta tìm hiểu cách để các nguyên tử trong lệch mạng sắp xếp lại thì có thể nhận thấy rằng lệch mạng biên chỉ có thể chuyển động vuông góc với mặt phẳng được thêm vào. Trái lại, lệch mạng xoắn có thể chuyển động theo mọi hướng.* Một trường hợp tổng quát quan trọng, các lệch mạng hỗn hợp, tức là sự pha trộn 2 loại lệch mạng, là các *vòng lệch mạng* đóng. Trên vòng lệch mạng đó, mức độ pha trộn thay đổi liên tục từ nơi này sang nơi khác.

Một lệch mạng được mô tả bằng *cường độ* và *kích thước* hiệu dụng của nó; chúng được biểu diễn một cách tương ứng với màu đỏ và màu xanh trong Hình 168. *Cường độ* lệch mạng được đo bằng *vector Burgers*; nó đo độ không phù hợp của tinh thể quanh

* Xem uet.edu.pk/dmems/edge_dislocation.htm, uet.edu.pk/dmems/screw_dislocation.htm và uet.edu.pk/dmems/mixed_dislocation.htm để quan sát sự chuyển động của lệch mạng.



HÌNH 168 Hai kiểu lệch mạng thuần tuý, lệch mạng biên và xoắn, được nhìn từ bên ngoài một tinh thể lập phương (hình bên trái) và lệch mạng hỗn hợp – 1/4 của một vòng lệch mạng – nối các lệch mạng trong một thiết diện ngang của cùng 1 tinh thể (hình bên phải) (© Ulrich Kolberg).

lệch mạng. Nói chính xác hơn, vector Burgers xác định tỷ lệ của tinh thể hoàn hảo phải dời đi sau khi ta cắt nó rời ra, để tạo ra chỗ lệch mạng. Điều hiển nhiên là cường độ lệch mạng được lượng tử hoá thành bội của vector Burgers nhỏ nhất. Đúng ra ta có thể xem các lệch mạng có vector Burgers lớn như được tạo thành từ các lệch mạng có vector Burgers nhỏ nhất, sao cho ta chỉ cần nghiên cứu loại sau.

Kích thước hay *bề rộng* của lệch mạng được đo bằng *bề rộng hiệu dụng* w. Bề rộng này cũng là bội của vector mạng. Bề rộng này đo kích thước của miền tinh thể bị biến dạng quanh chỗ lệch mạng. Điều hiển nhiên là kích thước của lệch mạng phụ thuộc vào tính chất đàn hồi của tinh thể, có thể nhận giá trị liên tục và phụ thuộc hướng. Bề rộng này có liên hệ với năng lượng của chỗ lệch mạng.

Một lệch mạng tổng quát có thể chuyển động được, mặc dù chỉ theo hướng trực giao với hướng của riêng nó và hướng vector Burgers. Lệch mạng xoắn đơn giản hơn: chúng có thể chuyển động theo mọi hướng. Chuyển động của lệch mạng xoắn có một tính chất đặc biệt. Ta gọi c là tốc độ âm trong một tinh thể thuần tuý (tức là trong một tinh thể lập phương). Như Frenkel và Kontorowa tìm thấy năm 1938, khi lệch mạng xoắn chuyển động với vận tốc v, bề rộng w thay đổi theo công thức

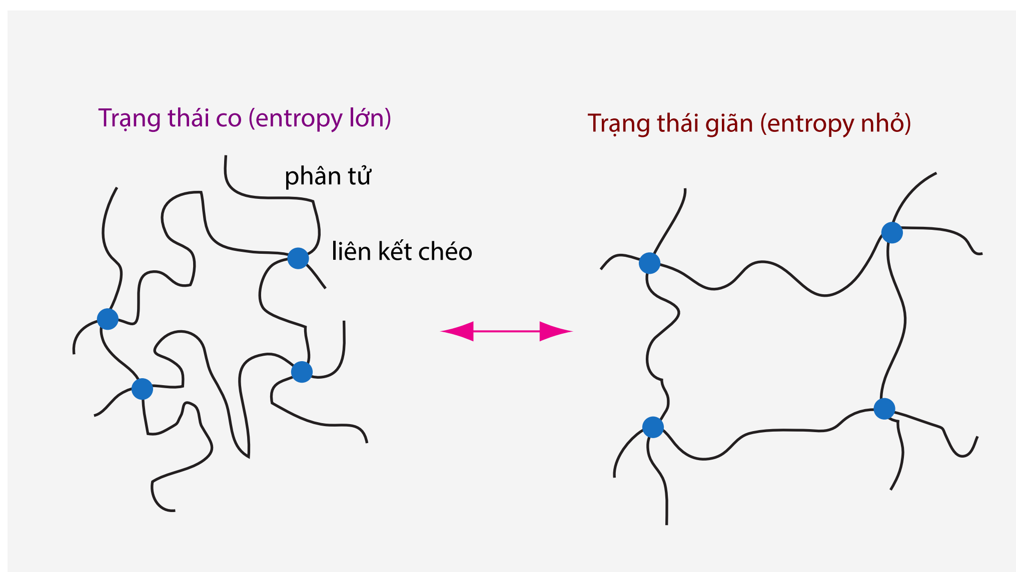
Xem 253

$$w = \frac{w_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} . \tag{125}$$

Ngoài ra, năng lượng của lệch mạng chuyển động tuân theo công thức

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} . \tag{126}$$

Một lệch mạng xoắn không thể chuyển động nhanh hơn tốc độ âm c trong một tinh thể



HÌNH 169 Một minh hoạ về mối liên hệ giữa cấu hình polymer và tính đàn hồi. Phân tử trong trạng thái giãn có ít cấu hình khả hữu hơn nên entropy nhỏ hơn; do đó, vật liệu có khuynh hướng trở lại trạng thái co.

và bề rộng của nó chứng tỏ sự co nhỏ phụ thuộc vào tốc độ. (Lệch mạng biên có hành trạng tương tự nhưng phức tạp hơn.) Chuyển động của lệch mạng xoắn trong chất rắn được mô tả bằng các hiệu ứng và các công thức tương tự mô tả chuyển động của vật thể trong Thuyết tương đối đặc biệt; tốc độ âm là giới hạn tốc độ của các lệch mạng giống như tốc độ ánh sáng là tốc độ giới hạn của các vật thể.

Điều này có đồng nghĩa với việc các hạt sơ cấp là các lệch mạng của không gian, không-thời gian, hay cả vòng lệch mạng hay không? Sự nghiên cứu đang tăng dần sức quyến rũ, dù người ta đã giả sử rằng không-thời gian là một tinh thể chất rắn và như vậy mâu thuẫn với mô hình không gian/không thời gian là một lưu chất. Tệ hơn, chẳng bao lâu nữa, ta sẽ gặp các lý do khác, khiến ta phải bỏ mô hình không-thời gian là một Quyển VI, trang 76 mạng; có lẽ bạn đã tìm thấy một vài lập luận của chính bạn. Vẫn còn các biểu thức (125) Câu đố 147 s và (126) để lệch mạng tiếp tục mê hoặc ta. Đến đây ta bị rối. Không-thời gian hình như là chất rắn đồng thời là lưu chất. Dù có mâu thuẫn, cuộc bàn luận ít nhiều gì cũng cho ta ấn tượng rằng có điều chờ ta khám phá. Đó là điều gì? Ta sẽ tìm thấy nó trong phần cuối cuộc hành trình.

Polymer

Việc nghiên cứu polymer vừa quan trọng về mặt kinh tế lại có tính hấp dẫn về mặt lý Xem 254 thuyết. Polymer, vật liệu tạo dựng nên các phân tử vĩ mô dài và linh hoạt, là những chuỗi nhiều ('poly' trong tiếng Hy Lạp) monomer giống nhau. Các đại phân tử này là các thực thể linh hoạt.

Polymer tạo nên *chất rắn*, như cao su hay plexiglas, *melts*, được sử dụng trong điều trị răng, *dung dịch*, như keo, sơn, trứng, hay con người. Polymer khí ít quan trọng hơn.

Tất cả các tính chất của polymer, như tính đàn hồi, độ nhớt, độ dẫn điện hay điểm

nóng chảy không rõ ràng, phụ thuộc vào số monomer và topo của các phân tử thành phần. Trong nhiều trường hợp, người ta có thể tính được sự phụ thuộc này. Chúng ta hãy xem một thí dụ.

Nếu L là chiều dài chu tuyến của một phân tử polymer không phân nhánh, lý tưởng, tự do, khoảng cách *trung bình* giữa 2 đầu R tỷ lệ với căn bậc 2 của L:

$$R = \sqrt{Ll} \sim \sqrt{L} \quad \text{hay} \quad R \sim \sqrt{N} \tag{127}$$

với N là số monomer và l là chiều dài monomer hiệu dụng mô tả kích cỡ mà phân tử polymer vững chắc nhất. R thường nhỏ hơn L; điều này có nghĩa là các phân tử polymer lý tưởng, tự do thường có dạng *xoắn như lò xo*.

Điều hiển nhiên là khoảng cách giữa 2 đầu R thay đổi từ phân tử này đến phân tử kia và tuân theo phân bố Gauss đối với xác suất P theo R:

$$P(R) \sim \mathrm{e}^{\frac{-3R^2}{2Nl^2}} . \tag{128}$$

Khoảng cách 2 đầu trung bình để cập ở trên là căn quân phương của phân bố này. Polymer không lý tưởng, giống như khí không lý tưởng, là polymer có tương tác với các phân tử lân cận hay với dung môi. Trong thực tế polymer lý tưởng khá hiếm: polymer chỉ lý tưởng trong một vài dung môi hay melts nào đó.

Nếu một polymer bị *kéo giãn*, các phân tử phải sắp xếp lại. Điều này làm thay đổi entropy của chúng và tạo ra một lực đàn hồi f có tác dụng ngăn chặn sự kéo giãn. Đối với polymer lý tưởng, lực này không bắt nguồn từ tương tác phân tử mà từ entropy trong thiên nhiên. Do đó ta có thể suy ra nó từ *năng lượng tự do*

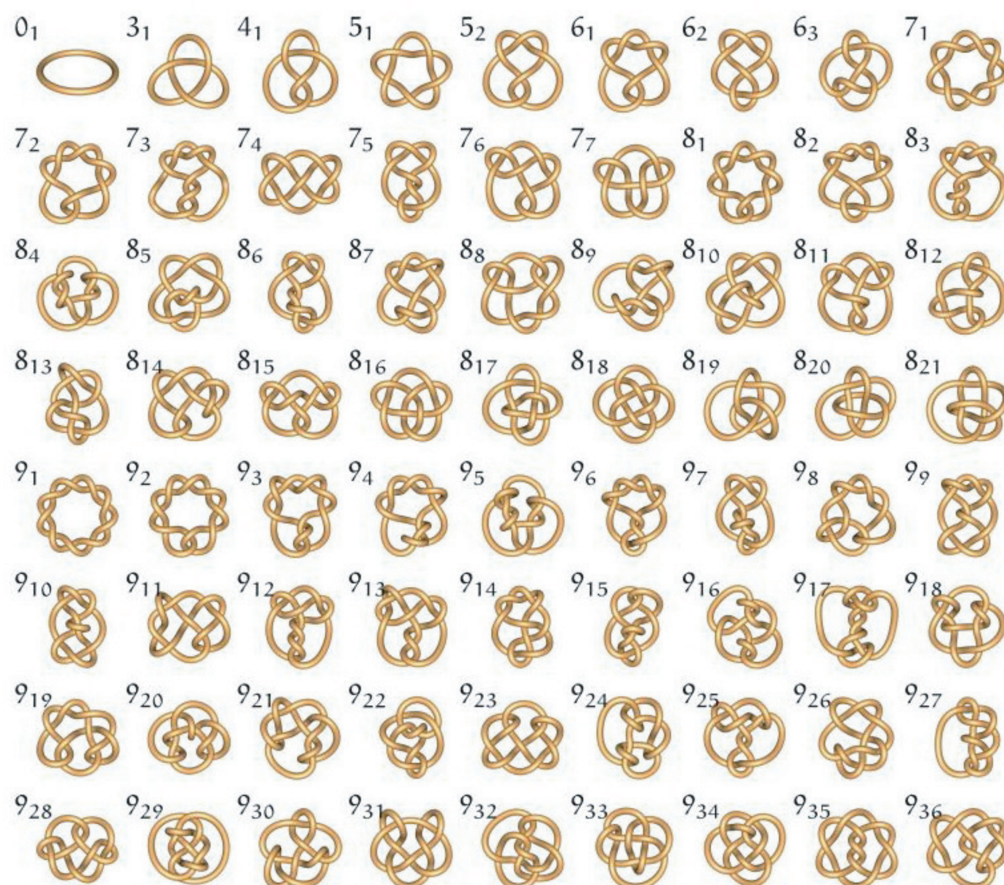
$$F \sim -T \ln P(R) \tag{129}$$

của polymer: như vậy lực sẽ là $f = \partial F(R)/\partial R$. Đối với polymer lý tưởng, bằng cách sử
Câu đố 148 e dụng phân bố xác suất của nó, lực này hoá ra tỷ lệ với chiều dài bị kéo giãn. Như vậy ta có thể dùng hệ số đàn hồi k

$$k = \frac{f}{R} = \frac{3T}{Ll} . \tag{130}$$

Như vậy ta có thể suy ra một tính chất của vật liệu, hệ số đàn hồi k, từ một ý tưởng đơn giản là polymer được tạo thành từ các phân tử dài, đàn hồi. Tính tỷ lệ với nhiệt độ T là kết quả của bản chất entropy của lực; sự phụ thuộc vào L cho ta thấy rằng phân tử càng dài thì càng dễ kéo giãn. Đối với polymer thực, không lý tưởng, tính toán sẽ phức tạp hơn nhưng phương pháp tính cũng tương tự. Thật vậy, đây là cơ chế nền tảng của tính đàn hồi của cao su.

Sử dụng năng lượng tự do của hình thể polymer, ta có thể xác định các tính chất vật liệu của các đại phân tử trong nhiều trạng thái khác, như phản ứng của chúng đối với sự nén, sự thay đổi thể tích của chúng trong melt, tương tác của chúng trong dung dịch, tác dụng của các phân tử phân nhánh, v.v... Đây là một lĩnh vực kiến thức rộng lớn mà ta sẽ không nói tiếp ở đây. Các chủ đề nghiên cứu hiện đại bao gồm việc nghiên cứu các polymer thắt gút và hỗn hợp các polymer. Các tính toán bằng máy tính và thực nghiệm



HÌNH 170 Các sơ đồ gút đối với các gút sơ cấp đơn giản nhất (© Robert Scharein).

thường xuyên được so sánh với nhau.

Polymer có liên hệ với cấu trúc của không gian vật lý không? Chủ đề này đang tiếp diễn. Tuy nhiên, điều chắc chắn là polymer thường bị thắt gút và liên kết với nhau.

Gút và liên kết

> “Đừng chạm vào đây nếu không tôi sẽ thắt các ngón tay bạn thành các gút!
> (Kỹ thuật giáo dục trẻ em tuy khó chịu nhưng hiệu quả lạ kỳ.)”

Gút và sự tổng quát hoá của nó là phần nghiên cứu quan trọng về chuyển động của các vật thể linh hoạt. *Gút (toán học)* là một dây cao su đóng, tức là một sợi dây có các đầu dán với nhau, không thể biến dạng thành một vòng tròn hay một vòng đơn giản. Vòng đơn giản còn được gọi là *gút tầm thường*.

Gút có ý nghĩa quan trọng trong ngữ cảnh của chương này vì chúng giúp ta hình dung được giới hạn của chuyển động của các vật linh hoạt. Ngoài ra, ta sẽ còn khám phá thêm Xem 255 các nguyên do dẫn tới việc nghiên cứu các gút. Trong phần này, ta chỉ giải trí một chút.

*

Năm 1949, Schubert đã chứng minh rằng mỗi gút đều có thể phân tích, theo một cách
Xem 256
duy nhất, thành tổng của các gút sơ cấp. Gút giống như số nguyên.

Nếu gút sơ cấp được sắp thứ tự theo số lượng chéo, như trong Hình 170, gút tầm thường (0_1) đi trước gút 3 lá (3_1) và gút hình số 8 (4_1). Hình này chỉ trình bày các *gút sơ cấp*, tức là các gút không thể phân tích thành hai gút được nối với nhau bằng hai dây song song. Ngoài ra, hình chỉ trình bày một trong hai phiên bản khả hữu, đối xứng gương.

Cùng với việc tìm kiếm các bất biến, việc lập bảng các gút – kết quả của sự phân loại – là một môn thể thao toán học hiện đại. Sơ đồ gút phẳng được sắp thứ tự theo số chéo tối thiểu như đã làm trong Hình 170. Có 1 gút không chéo, 1 có 3 chéo và 1 có 4 chéo
Xem 256
(không kể gút đối xứng gương); có 2 gút có 5 chéo và 3 gút có 6 chéo, 7 gút 7 chéo, 21 gút 8 chéo, 41 gút 9 chéo, 165 gút 10 chéo, 552 gút 11 chéo, 2176 gút 12 chéo, 9988 gút 13 chéo, 46 972 gút 14 chéo, 253 293 gút 15 chéo và 1 388 705 gút 16 chéo.

Ảnh qua gương của một gút thường, nhưng không luôn luôn, khác với gút gốc. Nếu bạn thích đố vui, hãy thử chứng tỏ rằng gút 3 lá, gút có 3 chéo, khác với ảnh qua gương của nó. Chứng minh bằng toán đầu tiên là của Max Dehn năm 1914.

Không có phản gút. *Phản gút* là gút trên một sợi dây sẽ triệt tiêu gút tương ứng khi cả 2 gặp nhau trên sợi dây đó. Việc chứng minh không có điều này cũng dễ. Ta lấy một dãy
Xem 257
vô hạn các gút và phản gút trên một sợi dây, $K-K+K-K+K-K$.... Một mặt, ta có thể làm chúng biến mất bằng cách này $K-K+K-K+K-K... = (K-K)+(K-K)+(K-K)... = 0$. Mặt khác, ta có thể làm điều tương tự bằng cách dùng $K - K + K - K + K - K... = K + (-K + K) + (-K + K) + (-K + K)... = K$. Gút duy nhất K có một phản gút như vậy là không có gút, tức $K = 0$.**

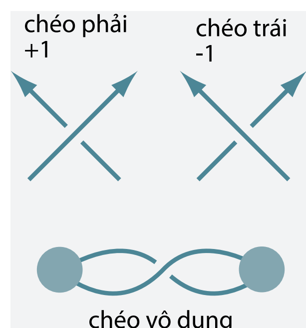
Làm cách nào để ta có thể mô tả một gút như vậy qua điện thoại? Các nhà toán học đã mất nhiều thời gian để tìm ra những cách thông minh để đạt được mục đích này. Cách hiển nhiên là ép phẳng gút lên trên một mặt phẳng và liệt kê vị trí và loại (dưới hay trên) của các nơi bắt chéo dây. (Xem Hình 171.) Nhưng cách *đơn giản nhất* để mô tả gút qua điện thoại là gì? Công việc này chưa được hoàn thành nhưng đã đi vào giai đoạn kết thúc. Các toán gia không nói về 'thông điệp qua điện thoại', họ nói về *các bất biến gút*, tức là các đại lượng không phụ thuộc vào hình dạng chính xác của gút. Ngày nay, cách mô tả gút tốt nhất là sử dụng bất biến đa thức. Đa số kiến thức phần này do Vaughan Jones khám phá vào năm 1984. Tuy vậy, mặc dù đa thức Jones có cho ta một cách mô tả duy nhất của phần lớn các gút đơn, thì nó lại không làm được như vậy trong các trường hợp phức tạp hơn. Nhưng sau cùng đa thức Jones cũng cho phép các toán gia chứng minh rằng một sơ đồ, được thay đổi và khử các chéo vô ích (tức là bị 'rút gọn'), thực sự là một sơ đồ có số chéo ít nhất. Đa thức này cũng cho phép ta chứng minh rằng 2 sơ đồ rút gọn bất kỳ liên hệ với nhau qua một dãy các phép 'lật'.

Tóm lại, cách đơn giản nhất để mô tả một gút qua điện thoại là cung cấp đa thức Kauffman của nó cùng với vài đa thức khác.

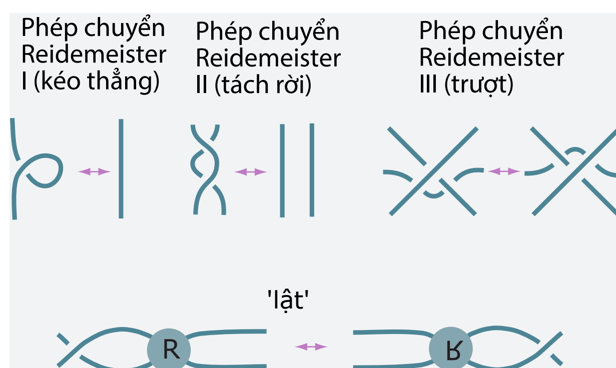
Vì gút ổn định đối với thời gian, một đường có gút trong không gian 3 chiều tương đương với một mặt phẳng có gút trong không-thời gian. Khi lý luận với số chiều cao hơn

* Những minh hoạ đẹp và các thông tin chi tiết về gút có thể tìm được trên website Knot Atlas ở katlas.math.toronto.edu và website KnotPlot ở www.knotplot.com.

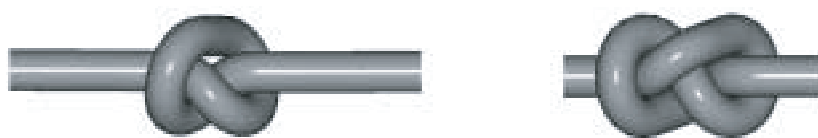
** Chứng minh này *không* thể thực hiện với các con số; ta có thể suy ra 1 = 0 bằng cách đặt K=1. Tại sao
Câu đố 149 s
chứng minh này đúng với gút nhưng sai đối với các con số?



HÌNH 171 Các loại chéo trong gút.



HÌNH 172 Các phép chuyển Reidemeister và phép 'lật'.



HÌNH 173 Một gút đơn và một gút đơn hình số 8 (© Piotr Pieranski)

ta cần cẩn thận. Mỗi gút (hay đường có gút) có thể tháo ra thành 4 hay nhiều chiều hơn. Tuy vậy, không có mặt nào *nhúng* trong không gian 4 chiều có một mảnh 1 gút khi $t = 0$, và một mảnh hình tròn khi $t = 1$. Việc nhúng một mặt như vậy cần ít nhất 5 chiều.

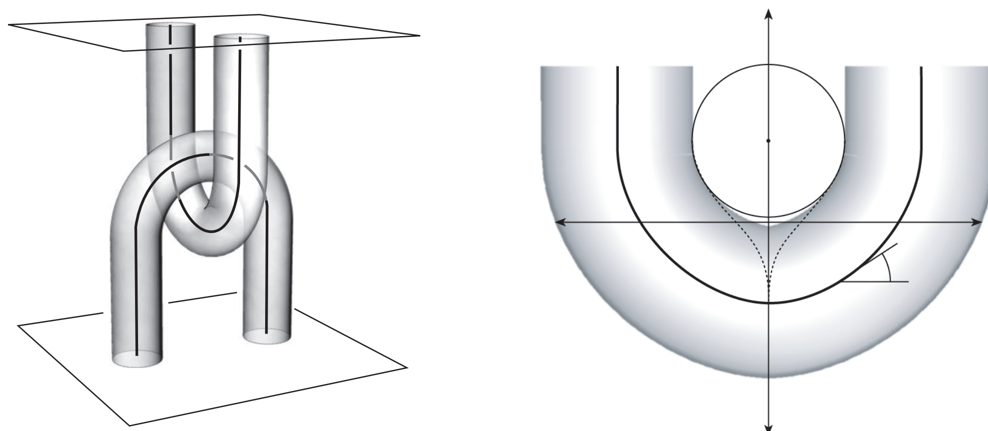
Khi số chiều cao hơn, *chỉ* có thể có gút nếu ta thắt các hình cầu n chiều thay vì hình tròn; thí dụ như ta đã đề cập, hình cầu 2 chiều có thể thắt thành gút 4 chiều, hình cầu 3 chiều có thể thắt thành gút 5 chiều v.v...

Những bài toán mở khó nhất mà bạn có thể kể cho bà của bạn

Mặc dù các toán gia đã đạt được nhiều thành tựu trong việc phân loại các gút, nhưng đáng ngạc nhiên là họ lại không biết gì về *hình dạng* của gút. Sau đây là một vài vấn đề chưa giải quyết được:

— Một bài toán gút đơn giản nhất: Bạn hãy tưởng tượng một dây linh hoạt lý tưởng, tức là, dây có bán kính như nhau ở mọi nơi nhưng có độ cong có thể thay đổi tuỳ ý. Câu đố 150 r Thắt 1 gút 3 lá bằng dây này. Các đầu dây đến gần hơn bao nhiêu? Năm 2006, chỉ có đáp số do ước tính: khoảng 10.1 bán kính dây. Không có công thức để tính ra con số 10.1. Ngoài ra, bạn hãy giải bài toán sau: chiều dài dây của một gút 3 lá đóng là bao nhiêu? Cũng trong trường hợp này, ta cũng chỉ có trị số – khoảng 16.33 bán kính dây – chứ không có công thức chính xác. Dĩ nhiên điều này cũng đúng cho các gút khác.

— Đối với các gút toán học, tức là các gút *đóng*, bài toán sau cũng không giải được. Thí dụ như chiều dài dây của gút 3 lá chặt là 16.33 đường kính dây và của gút hình số 8 là Xem 259 21.04 đường kính dây. Để chiêm ngưỡng vẻ đẹp của quá trình thắt gút hãy xem các



HÌNH 174 Bài toán chiều dài dây của một cái móc đơn giản và cấu hình được đề nghị, có thể cực tiểu hoá chiều dài dây, để lại một khoảng trống giữa 2 dây (© Jason Cantarella).

hoạt hình trên website www.jasoncantarella.com/movs. Nhưng công thức tính chiều dài này là gì? Không ai biết, vì người ta không biết chính xác hình dạng của gút 3 lá – hay một gút bất kỳ nào khác. Lou Kauffman có một bình luận đơn giản về tình trạng này: 'Đó là một "scandal"của toán học!'

— Các toán gia cũng nghiên cứu nhiều cấu trúc tổng quát hơn gút. *Liên kết* là sự tổng quát hoá của gút sang nhiều dây đóng. *Bện* và *liên kết dài* là sự tổng quát hoá của liên kết sang các dây *mở*. Một điều ngạc nhiên nữa được minh hoạ trong Hình 174. Dù 2 dây tạo thành một *móc* đơn giản, tức là 2 chữ 'U' liên kết với nhau, bài toán chiều dài dây vẫn không giải được – và cũng không có liên quan đến một gút nào ở đây! Đúng ra vào năm 2004, Jason Cantarella và cộng sự đã trình bày một hình mẫu có thể cực tiểu hoá chiều dài dây. Điều lạ lùng là cấu hình để nghị này để lại một khoảng trống nhỏ giữa 2 dây như ta thấy trong Hình 174.

Xem 260

Tóm lại, hình dạng của gút là một chủ đề nghiên cứu gần như đã bị loại bỏ. Do đó ta phải để lại các câu hỏi này cho một dịp khác trong tương lai.

CÁC CÂU ĐỐ VUI VÀ LẠ VỀ GÚT VÀ CÁC THỰC THỂ LINH HOẠT

Gút ít xuất hiện trong thiên nhiên. Thí dụ như các nhánh cây hay rễ cây hình như không phát triển nhiều gút trong cuộc đời của cây. Cây đã tránh được điều này như thế nào? Nói cách khác, tại sao không có chuối có gút hay cành hoa có gút trong thiên nhiên?

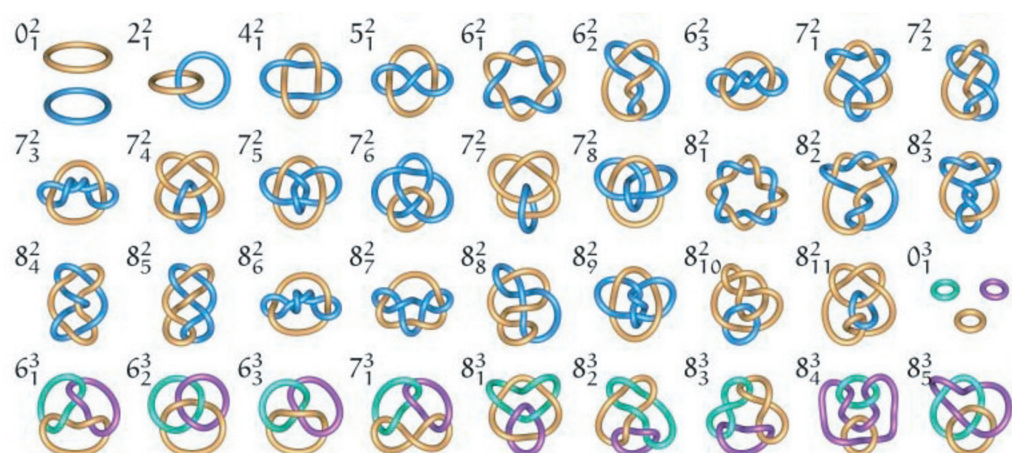
Câu đố 151 r

Các nghiên cứu gần đây cũng đã tìm hiểu cách mà bạch tuộc không để các vòi bị thắt gút. Người ta đã khám phá ra rằng các vòi tiết ra một chất giúp cho vòi không bị dính với nhau.

* *

Không chỉ có gút mà các liên kết cũng được phân loại. Liên kết đơn giản nhất là liên kết mà cấu hình đơn giản nhất của nó có số chéo ít nhất, như ta thấy trong Hình 175.

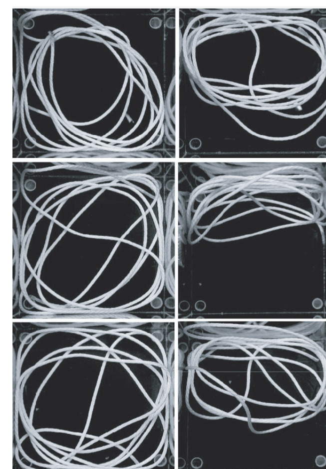
* *



HÌNH 175 Sơ đồ của các liên kết đơn giản nhất có 2 và 3 thành phần (© Robert Scharein).



HÌNH 176 Một con lươn Myxine thắt thành một cái gút (© Christine Ortlepp).



HÌNH 177 Cách mà tính trật tự của một cuộn dây dài (hình bên trái) thay đổi theo thời gian khi bị rung lắc trong container (hình bên phải) (© 2007 PNAS).

Vật lý của sự bơi khá thú vị. Để hiểu rõ cách chuyển động để bơi cho nhanh hết mức, hãy thám hiểm website tuyệt vời coachsci.sdsu.edu/swim của Brent Rushall. Ông cho biết các động tác tay chân, thân thể và trình bày cách mà các nhà vô địch thực hiện các động tác này. Rushall cũng nói về các lý thuyết kỳ quái được tiết lộ trong giới bơi lội, như ý kiến sai lầm là lực nâng có vai trò quan trọng trong việc bơi.

* *

Xem 262
Một loại lươn nổi tiếng, *cá gút Myxine glutinosa*, hay hagfish hay lươn nhớt, có thể tạo thành một cái gút trong cơ thể và di chuyển gút này từ đầu đến đuôi. Hình 176 cho ta

thấy điều này. Hagfish sử dụng chuyển động này để phủ lên cơ thể một chất nhớt bảo vệ khiến các thú ăn thịt không tóm được nó; nó cũng sử dụng chuyển động này để thoát khỏi sự kìm kẹp của thú ăn thịt, rũ bỏ nhớt sau khi nguy hiểm đã trôi qua và đẩy vào con mồi mà nó đang cắn để rứt ra một miếng thịt. Mọi con cá gút đã được khảo sát đều chỉ tạo ra các gút 3 lá trái; đây cũng là một thí dụ về tính thủ đối xứng trong thiên nhiên.

* *

Protein, các phân tử tạo nên cấu trúc của nhiều tế bào là các chuỗi aminoacid. Hình như
Xem 261
có rất ít protein có gút và đa số là gút 3 lá. Tuy vậy, một protein có gút hình số 8 đã được William Taylor khám phá vào năm 2000.

* *

Một trong những khám phá tuyệt vời nhất trong những năm gần đây có liên quan tới gút trong các phân tử DNA. *Phân tử DNA* trong nhân tế bào có thể dài hàng trăm triệu cặp base; chúng cần được đóng và mở gói một cách đều đặn. Khi việc này được thực hiện thì nó giống như ta lấy một sợi dây dài ra khỏi một căn phòng.

Ta cũng đã biết là có thể cuộn một sợi dây và đặt nó vào một căn phòng sao cho nhìn có vẻ được cất giữ một cách ngăn nắp nhưng khi ta nắm một đầu để kéo nó ra thì một
Xem 263
số lớn các gút bỗng nhiên xuất hiện. Năm 2007, hiệu ứng này đã được tìm hiểu cặn kẽ. Dây dài một vài mét được đặt vào một hộp vuông rồi xóc lên, để tăng tốc hiệu ứng này. Kết quả như ta thấy trong Hình 177, thật đáng kinh ngạc: hầu như mọi gút có thể tưởng tượng được – có mức độ phức tạp tuỳ thuộc vào chiều dài và tính đàn hồi của sợi dây – đã được tạo ra bằng cách này.

Một cách ngắn gọn, sự quấn rối cũng xảy ra trong thiên nhiên khi tháo dỡ DNA trong nhân tế bào. Đời sống đòi hỏi các phân tử DNA di chuyển vào trong nhân tế bào mà không bị cản trở. Như vậy thiên nhiên đã làm gì? Thiên nhiên chọn cách tiếp cận đơn giản hơn: khi gặp chéo không mong muốn, nó cắt DNA, chuyển phần đó đi và nối 2 đầu lại với nhau. Trong nhân tế bào, có các enzyme đặc biệt gọi là topoisomerases, thực hiện quá trình này. Chi tiết của quá trình hấp dẫn này vẫn đang còn là đối tượng nghiên cứu.

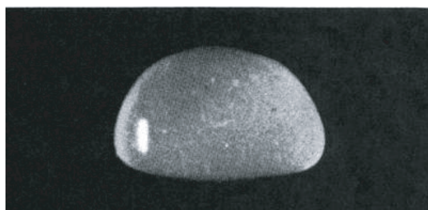
* *

Nhà toán học vĩ đại Carl-Friedrich Gauß – được viết là ‘Gauss’ trong tiếng Anh – là người đầu tiên thắc mắc về những điều xảy ra khi một dòng điện I chạy qua sợi dây A
Xem 264
liên kết với dây B. Ông khám phá ra một kết quả đẹp đẽ bằng cách tính tác dụng của từ trường của 1 dây tác dụng lên dây còn lại:

$$\frac{1}{4\pi I}\int_A \mathrm{d}\boldsymbol{x}_A \cdot \boldsymbol{B}_B = \frac{1}{4\pi}\int_A \mathrm{d}\boldsymbol{x}_A \cdot \int_B \mathrm{d}\boldsymbol{x}_B \times \frac{(\boldsymbol{x}_A - \boldsymbol{x}_B)}{|\boldsymbol{x}_A - \boldsymbol{x}_B|^3} = n\,, \qquad (131)$$

trong đó tích phân được lấy dọc theo sợi dây. Gauss nhận thấy rằng số n không phụ thuộc vào hình dạng chính xác của dây mà chỉ phụ thuộc vào cách chúng liên kết với nhau. Làm biến dạng dây cũng không làm n thay đổi. Các toán gia gọi con số như vậy là một *bất biến topo*. Tóm lại, Gauss khám phá ra một phương pháp vật lý để tính một bất biến toán học cho các liên kết; cuộc chạy đua tìm hiểu các bất biến khác, đặc biệt cho gút và bện vẫn còn tiếp diễn.

Trong thập niên 1980, Edward Witten đã có thể tổng quát hoá cách tiếp cận này để



HÌNH 178 Một giọt mưa lớn đang rơi xuống.



HÌNH 179 Điều này có thể xảy ra không?

bao gồm tương tác hạt nhân và để xác định thêm các bất biến gút phức tạp khác, một khám phá đã đem lại cho ông một huy chương Fields.

* *

Nếu ta đi dọc theo một gút và đếm số chéo nơi ta ở trên rồi trừ cho số chéo nơi ta đi qua bên dưới, ta sẽ có một số gọi là *số xoắn* của gút. Nó không phải là một bất biến nhưng nó thường là một công cụ để tạo ra chúng. Thật vậy, số xoắn không nhất thiết phải bất biến qua một trong ba phép chuyển Reidemeister. Bạn có thấy bất biến nào khi dùng Hình 172 không? Tuy vậy, số xoắn bất biến qua phép 'lật'.

* *

Lĩnh vực nghiên cứu về gút hiện nay vẫn còn một chủ đề chưa giải quyết được. Một Xem 265 khám phá gần đây là *sự chuẩn lượng tử hoá của số xoắn 3 chiều* trong các gút chặt. Người ta vẫn chờ nhiều khám phá trong lĩnh vực lý thuyết gút hình học.

* *

Câu đố 152 e Có 2 cách cột dây giày. Bạn có thể tìm ra chúng không?

* *

Câu đố 153 s Hình dạng của giọt mưa là gì? Hãy cố hình dung ra nó. Tuy vậy, hãy lý luận chứ đừng có định kiến! Nhân tiện cũng cần nói thêm là có một kích thước cực đại cho giọt mưa, Xem 266 khoảng 4 mm. Hình dạng của một giọt mưa lớn như vậy được trình bày trong Hình 178. Bạn có biết do đâu mà có giới hạn này không?

Để dễ so sánh ta nên biết giọt nước trong mây, sương mù hay sương có kích thước trong khoảng từ 1 tới 100 µm, tối đa là 10 tới 15 µm. Trong điều kiện mọi giọt nước có kích thước như nhauvà ánh sáng chỉ tán xạ trong giọt nước 1 lần, người ta có thể thấy Quyển III, trang 166 Quyển III, trang 132 hiện tượng quầng, hào quang haycầu vồng trong sương mù.

* *

Câu đố 154 s Thực thể trong Hình 179 là gì – gút, bện hay liên kết?

* *

Câu đố 155 d Bạn có thể phân loại gút cà vạt không?

* *



HÌNH 180 Một con rắn bay, Chrysopelea paradisii, đang thực hiện kỳ công đã mang lại cho nó cái tên này (QuickTime film © Jake Socha).

Câu đố 156 s Bạn có thể phân loại cách xỏ dây giày không?

* *

Một thí dụ đầy ấn tượng về cách hành xử của một thực thể linh hoạt được cho trong Hình 180. Thật ra có cả một họ rắn thích nhảy ra khỏi một cành cây và lướt qua không khí để đến một cây lân cận. Cả 2 kỹ thuật này đều được nghiên cứu trong các năm gần đây. Website www.flyingsnake.org của Jake Socha có thêm các đoạn film. Những bài báo hấp dẫn của ông nói khá nhiều về loài bò sát thú vị này. Xem 267

* *

Quyển I, trang 326 Khi một phi cơ bay với tốc độ siêu thanh qua không khí ẩm, đôi khi nó tạo nên các đám mây hình nón chuyển động cùng với nó. Đám mây này khác với những đám mây đã đề cập ở trên như thế nào? Câu đố 157 e

* *

Một trong những bài toán khó nuốt nhất là bài toán về mây: có thể tạo ra mưa theo yêu cầu không? Cho tới nay, chưa có kết quả khả quan nào. Việc phát minh ra một phương pháp, có thể dựa trên việc phun thêm muối hút ẩm hay nhờ laser, sẽ trợ giúp cho con người rất nhiều.

* *

Gút có liên hệ với các hạt sơ cấp không? Câu hỏi đã có hơn 150 năm nay. Đầu tiên nó đã được William Thomson-Kelvin và Peter Tait nghiên cứu vào cuối thế kỷ 19. Cho tới nay thì người ta chưa tìm ra mối liên hệ nào. Gút có lẽ sẽ quan trọng ở thang Planck, những kích thước khả hữu nhỏ nhất trong thiên nhiên. Ta sẽ tìm hiểu về mối liên hệ giữa gút và cấu trúc của hạt sơ cấp trong phần cuối của cuộc hành trình.

Tóm tắt về các vật thể linh hoạt

Quyển I, trang 315

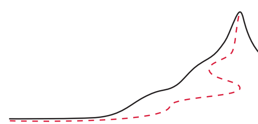
Ta có thể đúc kết các chuyển động khả hữu của hệ linh hoạt trong vài chủ đề then chốt. Trong các chương trước ta đã nghiên cứu sóng, soliton và sự đan xen vào nhau. Các hiện tượng này đã được mô tả bằng các phương trình sóng. Trong chương này ta đã tìm hiểu phương thức chuyển động bằng cách thay đổi hình dạng, tìm hiểu sự lộn trái, xoáy, lưu chất, polymer, gút và sự sắp xếp của chúng, chuyển động của các lệch mạng trong chất rắn. Ta đã thấy rằng sự thay đổi hình dạng được mô tả bằng lý thuyết chuẩn, sự lộn trái được mô tả bằng tính đối ngẫu của không gian, xoáy tuân theo phương trình Schrödinger, lưu chất và polymer có sự tương đồng với Thuyết tương đối tổng quát và hố đen, xác định hình dạng của gút là một điều khó và lệch mạng có hành trạng tương đối tính.

Chuyển động của các vật linh hoạt là chủ đề bị bỏ qua trong sách giáo khoa về chuyển động. Việc nghiên cứu đang phát triển như vũ bão; người ta mong đợi sẽ có nhiều phát kiến rực rỡ tương tự trong Vật lý cổ điển xuất hiện trong tương lai. Ở chương này ta đã không tìm hiểu một chút gì về sự tương tự đối với chuyển động của ánh sáng. Việc bao gồm Thuyết lượng tử vào sự mô tả chuyển động của các vật linh hoạt vẫn còn là một đề tài mê hoặc đối với bất cứ ai nhắm tới việc công bố các công trình mới trong lĩnh vực này.

Câu đố 158 r

Tóm lại, ta thấy rằng các vật thể linh hoạt có thể tái sinh nhiều lĩnh vực trong vật lý hiện đại. Chúng có tái sinh *toàn bộ* vật lý hiện đại không? Ta sẽ tìm câu trả lời trong quyển cuối cùng.





Chương 12

Vật lý lượng tử tái giản lược

So với Vật lý cổ điển, Thuyết lượng tử phức tạp hơn hẳn. Tuy nhiên, ý tưởng cơ bản thì khá đơn giản: trong thiên nhiên có một biến đổi nhỏ nhất hay tác dụng cực tiểu, có giá trị $\hbar = 1.1 \cdot 10^{-34}$ Js. Tác dụng cực tiểu khiến cho có những hiện tượng kỳ lạ xảy ra trong thế giới vi mô, như tính chất sóng của vật chất, hệ thức bất định, sự mất điều hợp, sự ngẫu nhiên trong đo lường, tính không phân biệt được, sự lượng tử hoá moment động lượng, sự xuyên hầm, sự sinh cặp, sự phân rã, phản ứng hạt và sự trao đổi các hạt ảo.

Tóm tắt Thuyết trường lượng tử

> “Deorum offensae diis curae.”
>
> Voltaire, *Traité sur la tolérance.*

Toàn bộ Thuyết lượng tử có thể tóm tắt trong vài câu.

▷ Trong thiên nhiên, không thể có tác dụng nhỏ hơn $\hbar = 1.1 \cdot 10^{-34}$ Js.

Sự hiện hữu của tác dụng cực tiểu trong thiên nhiên trực tiếp dẫn tới bài học chính trong phần lượng tử của cuộc hành trình:

▷ Các vật chuyển động phải được tạo ra từ quanton hay hạt lượng tử.

▷ Có các hạt lượng tử *sơ cấp*.

Các phát biểu này áp dụng cho mọi vật, mọi hình ảnh, tức là vật chất và bức xạ. Vật chuyển động làm bằng *quanton*. Đá, sóng nước, ánh sáng, sóng âm, động đất, kem đánh răng và mọi vật mà ta tương tác đều được tạo thành từ các hạt lượng tử chuyển động. Thực nghiệm chứng tỏ rằng:

▷ Mọi tính chất riêng của vật mà ta thấy trong thiên nhiên – như điện tích, nhược tích, sắc tích, spin, số chẵn lẻ, số lepton, ... và một ngoại lệ duy nhất là khối lượng – đều là số *nguyên* của một đơn vị nhỏ nhất; trong các hệ phức hợp chúng có thể được cộng hay nhân với nhau.

Trang 261

▷ Một *hạt lượng tử sơ cấp* hay *quanton sơ cấp* là một thực thể đếm được, nhỏ hơn bước sóng Compton của chính nó, được mô tả bằng năng–động lượng, khối lượng, spin, số chẵn lẻ C, P và T, điện tích, sắc tích, nhược tích, spin đồng vị, số lạ, số duyên, số đỉnh, số đẹp, số lepton và số baryon.

Mọi thực thể chuyển động đều được tạo thành từ các hạt lượng tử sơ cấp. Để hiểu ý nghĩa của điều này, bạn có thể áp dụng nó vào các thực thể chuyển động nhưng thường bị bỏ quên, như ma quái, tinh thần, thiên thần, mỹ thần, ma quỷ, ác quỷ, nam thần, nữ thần và linh hồn. Bạn có thể tự kiểm tra những điều xảy ra khi ta tính đến bản chất hạt của chúng.

Câu đố 159 e

Các hạt lượng tử không bao giờ đứng yên, không định xứ, chuyển động mang tính xác suất, hành xử như hạt hoặc sóng, có thể giao thoa, phân cực, xuyên hầm, không thể phân biệt được, có phản hạt, tương tác mang tính địa phương, xác định thang đo chiều dài và thời gian, giới hạn độ chính xác của phép đo.

Có 2 loại hạt lượng tử:

▷ Vật chất được tạo thành từ các *fermion:* quark và lepton. Có 6 quark tạo nên hạt nhân và 6 lepton – 3 lepton có điện tích, bao gồm electron và 3 neutrino không mang điện. Fermion sơ cấp có spin 1/2 và tuân theo nguyên lý loại trừ Pauli.

▷ Bức xạ bắt nguồn từ 3 tương tác chuẩn và được tạo thành từ các *boson*: photon, boson vector yếu và 8 gluon. Các boson sơ cấp này đều có spin 1.

Trong cuộc thám hiểm, ta muốn biết vật chất và tương tác là gì. Đến đây ta đã biết: chúng bắt nguồn từ các hạt lượng tử sơ cấp. Việc tìm hiểu chuyển động bên trong vật chất, bao gồm phản ứng hạt và trao đổi hạt ảo, cho ta thấy rằng vật chất được tạo thành từ *một số hữu hạn* của các hạt lượng tử sơ cấp. Thực nghiệm chứng tỏ rằng:

▷ Trong không gian phẳng, hạt sơ cấp tương tác bằng một trong 3 cách: *tương tác điện từ*, *tương tác hạt nhân mạnh* và *tương tác hạt nhân yếu*.

▷ Ba tương tác là *sự trao đổi các boson ảo*.

▷ Ba tương tác được mô tả bằng các đối xứng chuẩn U(1), SU(3) và một đối xứng bị phá vỡ, tức đối xứng gần đúng SU(2).

Ba nhóm đối xứng chuẩn ấn định Lagrangian của mỗi hệ vật lý trong không-thời gian phẳng. Cách mô tả các Lagrangian đơn giản nhất là dùng giản đồ Feynman và các nhóm chuẩn.

▷ Trong mọi tương tác, năng lượng, động lượng, moment động lượng, điện tích, sắc tích, số chẵn lẻ CPT, số lepton và số baryon được bảo toàn.

Danh sách các đại lượng bảo toàn hàm ý rằng:

▷ Thuyết *trường* lượng tử là một phần của vật lý lượng tử bao gồm các mô tả *sự biến đổi của hạt*.

Khả năng biến đổi hạt – bao gồm các phản ứng hạt, phát xạ hạt và hấp thu hạt – là kết quả suy ra từ sự hiện hữu của tác dụng cực tiểu và tốc độ cực đại trong thiên nhiên. Sự phát xạ ánh sáng, phóng xạ, sự đốt cháy Mặt trời và lịch sử của vật chất phức hợp tạo nên chúng ta đều bắt nguồn từ sự biến đổi hạt.

Quyển IV, trang 31

Từ khả năng biến đổi hạt, Thuyết trường lượng tử đưa ra một giới hạn cho sự định xứ của hạt. Đúng ra một vật bất kỳ có khối lượng m chỉ có thể định xứ trong phạm vi bước sóng Compton

$$\lambda_{\mathrm{C}} = \frac{h}{mc} = \frac{2\pi\hbar}{mc} , \qquad (132)$$

trong đó c là tốc độ ánh sáng. Ở khoảng cách này ta phải bỏ mô tả cổ điển và sử dụng Thuyết trường lượng tử. Nếu ta dẫn tới bước sóng Compton, các biến đổi hạt trở nên quan trọng đến mức cả Vật lý cổ điển lẫn Thuyết lượng tử đơn giản đều không đủ.

Điện động lực học lượng tử là mô tả lượng tử của điện từ trường. Nó bao gồm và giải thích mọi biến đổi hạt liên quan tới photon. Lagrangian của QED được xác định bởi nhóm chuẩn điện từ U(1), các điều kiện của đối xứng không-thời gian (Poincaré), đối xứng hoán vị và tính tái chuẩn hoá được. Yêu cầu sau suy ra từ tính liên tục của không-thời gian. Thông qua tác dụng của các hạt ảo, QED mô tả sự phân rã điện từ, đèn, laser, sự sinh cặp, bức xạ Unruh đối với quan sát viên có gia tốc, năng lượng chân không và hiệu ứng Casimir tức là sự hút nhau của các vật dẫn trung hoà. Các biến đổi hạt bắt nguồn từ Điện động lực học lượng tử cũng đưa ra các hiệu chỉnh cho Điện động lực học cổ điển; ngoài ra các biến đổi hạt cũng tạo ra những sai lệch nhỏ của nguyên lý chồng chất đối với trường điện từ, bao gồm khả năng tán xạ photon-photon.

Lý thuyết *tương tác hạt nhân yếu* mô tả sự vi phạm tính chẵn lẻ, hoà trộn quark, hoà trộn neutrino, boson vector nặng và trường Higgs đối với sự phá vỡ tính đối xứng chuẩn yếu SU(2). Tương tác yếu giải thích được phần lớn sự phóng xạ, bao gồm sự sinh nhiệt trong Trái đất và các quá trình khiến cho Mặt trời chiếu sáng.

Sắc động lực học lượng tử, lý thuyết trường của tương tác hạt nhân mạnh, mô tả mọi biến đổi hạt liên quan tới gluon. Ở mức độ cơ bản, tương tác mạnh được 8 gluon sơ cấp làm trung gian. Ở tầm cỡ lớn hơn, thang fm, tương tác mạnh tác dụng thông qua sự trao đổi các pion spin 0, hút nhau rất mạnh, dẫn tới việc tạo thành các hạt nhân nguyên tử. Tương tác mạnh xác định việc dung hợp hạt nhân và phân hạch. Sắc động lực học lượng tử hay QCD, giải thích được khối lượng của meson và baryon thông qua việc mô tả chúng là các trạng thái của quark bị giam giữ.

Trang 201

Bằng cách bao gồm các biến đổi hạt, Thuyết trường lượng tử cung cấp một nền tảng chung cho các khái niệm và sự mô tả cho Khoa học vật liệu, Vật lý hạt nhân, Hoá học, Sinh học, Y học và phần lớn Thiên văn học. Thí dụ với cùng một khái niệm, ta có thể trả lời những câu hỏi như tại sao nước lại lỏng ở nhiệt độ phòng, đồng có màu đỏ, cầu vồng có màu, Mặt trời và ngôi sao liên tục chiếu sáng, tại sao có khoảng 110 nguyên tố, cây lấy vật liệu để làm ra gỗ ở đâu và tại sao ta có thể chuyển động bàn tay phải theo ý của ta. Thuyết lượng tử giải thích được nguồn gốc các tính chất của vật liệu và đời sống.

Thuyết trường lượng tử mô tả mọi tính chất của vật liệu, như tính chất cơ, quang, điện và từ. Nó mô tả mọi sóng xảy ra trong vật liệu, như âm và phonon, sóng từ và magnon, ánh sáng, plasmon và mọi kích thích định xứ. Thuyết trường lượng tử cũng mô tả các hiệu ứng tập thể trong vật chất như siêu dẫn, các hiệu ứng trong chất bán dẫn và siêu lưu. Sau cùng Thuyết trường lượng tử mô tả mọi tương tác giữa vật chất và bức xạ, từ

màu sắc tới sự tạo ra phản vật chất.

Thuyết trường lượng tử cũng minh giải tính chất hạt của thiên nhiên, bao gồm sự bảo toàn số hạt – là hiệu giữa hạt và phản hạt – suy ra từ khả năng mô tả tương tác *theo quan điểm nhiễu loạn*. Ta chỉ có thể mô tả thiên nhiên theo quan điểm nhiễu loạn khi năng lượng thấp. Ở mức năng lượng cực cao, hơn mức quan sát được trong thí nghiệm, điều này phải thay đổi và ta phải tính đến các tác dụng không nhiễu loạn. Ta sẽ tìm hiểu điều đó trong quyển kế tiếp.

ĐỘ CHÍNH XÁC MÀ NGƯỜI TA ĐÃ ĐẠT ĐƯỢC

Vật lý cổ điển không tiên đoán được *tính chất nào* của vật chất. Thuyết trường lượng tử tiên đoán được mọi tính chất của vật chất với độ chính xác rất cao – đôi khi tới 13 chữ số – trong các phép đo. Độ chính xác thường *không* bị giới hạn bởi sự không đúng của lý thuyết mà vì độ đúng của phép đo. Nói cách khác, sự phù hợp giữa Thuyết trường lượng tử và thực nghiệm chỉ bị giới hạn bởi số tiền mà người ta muốn bỏ ra. Bảng 25 cho ta thấy một số tiên đoán của Vật lý cổ điển và của Thuyết trường lượng tử. Các tiên đoán này được suy ra từ các tính chất của thiên nhiên mà người ta đã thu thập trong danh sách thiên niên kỷ, được trình bày trong phần kế tiếp.

BẢNG 25 Các so sánh chọn lọc giữa Vật lý cổ điển, Thuyết lượng tử và thực nghiệm.

Biến động lực	Tiên đoán cổ điển	Tiên đoán của Thuyết lượng tử [a]	Kích thước đo được	Chi phí-ước tính [b]
Chuyển động đơn giản của vật thể				
Độ bất định	0	$\Delta x \Delta p \geqslant \hbar/2$	$(1 \pm 10^{-2})\,\hbar/2$	10 k€
Bước sóng của vật chất	không có	$\lambda p = 2\pi\hbar$	$(1 \pm 10^{-2})\,\hbar$	10 k€
Tốc độ xuyên hầm trong phân rã α	0	$1/\tau$ hữu hạn	$(1 \pm 10^{-2})\,\tau$	5 k€
Bước sóng Compton	không có	$\lambda_c = h/(m_e c)$	$(1 \pm 10^{-3})\,\lambda$	20 k€
Tốc độ sinh cặp	0	σE	phù hợp	100 k€
Thời gian phân rã phóng xạ trong hydrogen	không có	$\tau \sim 1/n^3$	(1 ± 10^{-2})	5 k€
Moment động lượng cực tiểu	0	$\hbar/2$	$(1 \pm 10^{-6})\,\hbar/2$	10 k€
Hiệu ứng/áp suất Casimir	0	$p = (\pi^2 \hbar c)/(240 r^4)$	(1 ± 10^{-3})	30 k€
Màu sắc của vật thể				
Quang phổ của vật nóng	phân kỳ	$\lambda_{max} = hc/(4.956\,kT)$	$(1 \pm 10^{-4})\ \Delta\lambda$	10 k€
Dịch chuyển Lamb	không có	$\Delta\lambda = 1057.86(1)$ MHz	$(1 \pm 10^{-6})\,\Delta\lambda$	50 k€
Hằng số Rydberg	không có	$R_\infty = m_e c \alpha^2/(2h)$	$(1 \pm 10^{-9})\,R_\infty$	50 k€
Hằng số Stefan–Boltzmann	không có	$\sigma = \pi^2 k^4/(60 \hbar^3 c^2)$	$(1 \pm 3 \cdot 10^{-8})\,\sigma$	20 k€
Hằng số dịch chuyển Wien	không có	$b = \lambda_{max} T$	$(1 \pm 10^{-5})\,b$	20 k€
Chiết suất của nước	không có	1.34	vài %	1 k€

BẢNG 25 (Tiếp theo) Các so sánh chọn lọc giữa Vật lý cổ điển, Thuyết lượng tử và thực nghiệm.

Biến động lực	Tiên đoán cổ điển	Tiên đoán của Thuyết lượng tử [a]	Kích thước đo được	Chi phí ước tính [b]
Tán xạ photon-photon	0	từ QED: hữu hạn	phù hợp	50 M€
Sự hiện hữu của bức xạ Laser	không	có	phù hợp	10€
Hạt và tính chất tương tác				
Tỷ số hồi chuyển từ của electron	1 hay 2	2.002 319 304 3(1)	2.002 319 304 3737(82)	30 M€
Khối lượng boson Z	không có	$m_Z^2 = m_W^2(1 + \sin\theta_W^2)$	$(1 \pm 10^{-3})\,m_Z$	100 M€
Khối lượng Proton	không có	$(1 \pm 5\,\%)\,m_p$	m_p =1.67 yg	1 M€
Thời gian sống của Proton	≈ 1 μs	∞	$> 10^{35}$ a	100 M€
Tốc độ phản ứng hoá học	0	từ QED	đúng trong phạm vi sai số	2 k€
Tính chất của vật chất phức hợp				
Thời gian sống của nguyên tử	≈ 1 μs	∞	$> 10^{20}$ a	1 €
Kích thước phân tử	không có	từ QED	trong phạm vi 10^{-3}	20 k€
Hằng số Von Klitzing	∞	$h/e^2 = \mu_0 c/(2\alpha)$	$(1 \pm 10^{-7})\,h/e^2$	1 M€
Hằng số AC Josephson	0	$2e/h$	$(1 \pm 10^{-6})\,2e/h$	5 M€
Nhiệt dung của kim loại ở 0 K	25 J/K	0	$< 10^{-3}$ J/K	10 k€
Nhiệt dung của khí lưỡng nguyên tử ở 0 K	25 J/K	0	$< 10^{-3}$ J/K	10 k€
Mật độ nước	không có	1000.00 kg/m^3 ở 4°C	phù hợp	10 k€
Độ dẫn điện cực tiểu	0	$G = 2e^2/\hbar$	$G(1 \pm 10^{-3})$	3 k€
Tính thiết từ	không có	có	có	2 €
Tính siêu lưu	không có	có	có	200 k€
Sự ngưng tụ Bose–Einstein	không có	có	có	2 M€
Tính siêu dẫn (kim loại)	không có	có	có	100 k€
Tính siêu dẫn (T cao)	không có	*chưa có*	có	100 k€

a. Mọi tiên đoán này đều được tính toán từ đại lượng cơ bản được cho trong danh sách thiên niên kỷ.
b. Đôi khi chi phí tính toán để suy ra kết quả còn cao hơn chi phí thí nghiệm. (Bạn có thể chỉ ra các thí dụ không?) Số đã cho là tổng của 2 chi phí.

Câu đố 160 s

Ta cần chú ý rằng giá trị do Thuyết lượng tử tiên đoán không khác với trị đo được. Trái

lại, Vật lý cổ điển không cho phép chúng ta tính được giá trị nào cả. Điều này cho ta thấy sự tiến bộ mà Vật lý lượng tử đã đem lại cho việc mô tả thiên nhiên.

Tóm lại, trong lĩnh vực vi mô, Thuyết lượng tử phù hợp *hoàn toàn* với thiên nhiên; bất chấp mọi vinh quang, tài lộc và số các nhà nghiên cứu đông đảo, không hề có mâu thuẫn giữa lý thuyết và thực nghiệm. Nhưng không kể sự phù hợp đầy ấn tượng này, vẫn còn các thí nghiệm *chưa giải thích được*; chúng tạo nên *danh sách thiên niên kỷ*.

Điều gì không thể giải thích được bằng Thuyết lượng tử và Thuyết tương đối tổng quát?

Kiến thức thu lượm được trong phần lượng tử này, cùng với tóm tắt trong phần Thuyết tương đối trước kia, cho phép chúng ta mô tả *mọi* hiện tượng quan sát được có liên quan tới chuyển động. Đây là lần đầu tiên, không có sự khác biệt giữa lý thuyết và thực nghiệm.

Quyển II, trang 293

Dù có sự chính xác trong việc mô tả thiên nhiên nhưng vẫn có gì đó chưa đầy đủ. Khi ta hỏi ‘tại sao?’ về một thí nghiệm và tiếp tục hỏi sau mỗi câu trả lời thì ta đều đi đến một trong những tính chất *không giải thích được* nằm trong Bảng 26. Bảng này liệt kê mọi vấn đề về chuyển động cơ bản chưa được giải thích trong năm 2000, nên ta có thể gọi nó là *danh sách thiên niên kỷ* của các vấn đề chưa giải quyết được.

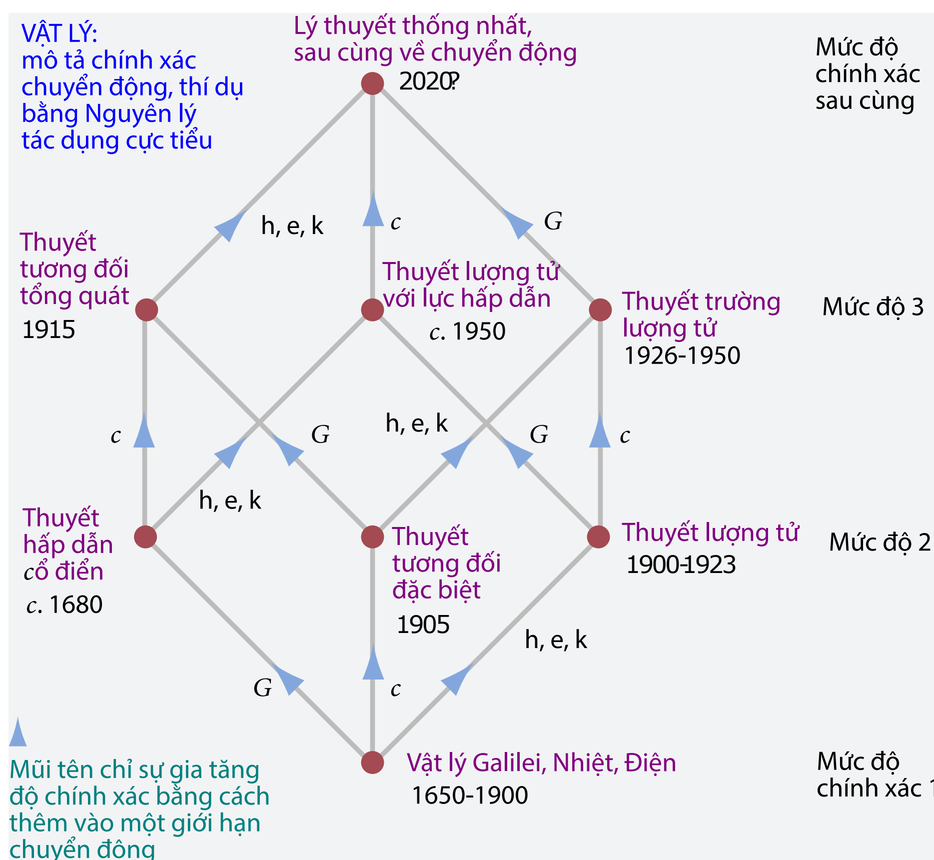
BẢNG 26 Danh sách thiên niên kỷ: những điều mà Mô hình chuẩn và Thuyết tương đối tổng quát không thể giải thích được; nó cũng là danh sách dữ liệu thực nghiệm duy nhất có sẵn dùng để kiểm chứng Lý thuyết mô tả chuyển động thống nhất, sau cùng.

Biến động lực	Tính chất chưa giải thích được kể từ năm 2000
Các đại lượng địa phương không giải thích được bằng Mô hình chuẩn: các tính chất của hạt	
$\alpha = 1/137.036(1)$	năng lượng của hằng số liên kết điện từ hay hằng số cấu trúc tinh tế ở mức năng lượng thấp
α_w hay θ_w	năng lượng của hằng số liên kết yếu hay góc hoà trộn yếu ở mức năng lượng thấp
α_s	hằng số liên kết mạnh tại một giá trị năng lượng riêng
m_q	khối lượng của 6 quark
m_l	khối lượng của 6 lepton
m_W	khối lượng của boson vector W
m_H	khối lượng của boson Higgs vô hướng
$\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$	góc hoà trộn của 3 quark
δ	phase vi phạm đối xứng CP đối với quark
$\theta^\nu_{12}, \theta^\nu_{13}, \theta^\nu_{23}$	góc hoà trộn của 3 neutrino
$\delta^\nu, \alpha_1, \alpha_2$	3 phase vi phạm đối xứng CP đối với neutrino
$3 \cdot 4$	số thế hệ fermion và số hạt trong mỗi thế hệ
J, P, C, v.v...	nguồn gốc của mọi lượng tử số của fermion và boson
Các khái niệm không giải thích được bằng Mô hình chuẩn	
$c, \hbar, k$	nguồn gốc của các đơn vị Planck bất biến trong Thuyết trường lượng tử
$3 + 1$	số chiều của không thời gian vật lý
SO(3,1)	nguồn gốc của đối xứng Poincaré, tức là spin, vị trí, năng lượng, động lượng

BẢNG 26 (Tiếp theo) những điều mà Mô hình chuẩn và Thuyết tương đối tổng quát không thể giải thích được.

Biến động lực	Tính chất chưa giải thích được kể từ năm 2000
Ψ	nguồn gốc và bản chất của hàm sóng
$S(n)$	nguồn gốc của phép đồng nhất hạt, tức là đối xứng hoán vị
Đối xứng chuẩn	nguồn gốc của các nhóm chuẩn, đặc biệt:
U(1)	nguồn gốc của nhóm chuẩn điện từ, tức là của sự lượng tử hoá điện tích, sự vắng mặt của từ tích và liên kết cực tiểu
SU(2)	nguồn gốc của nhóm chuẩn tương tác yếu, sự phá vỡ và vi phạm đối xứng P
SU(3)	nguồn gốc của nhóm chuẩn tương tác mạnh và sự bảo toàn CP
Nhóm tái chuẩn hoá	Nguồn gốc của các tính chất tái chuẩn hoá
$\delta W = 0$	nguồn gốc của nguyên lý tác dụng cực tiểu trong Thuyết lượng tử
$W = \int L_{SM}\,dt$	nguồn gốc của Lagrangian trong Mô hình chuẩn của Vật lý hạt
Các đại lượng toàn cục không giải thích được bằng Thuyết tương đối tổng quát và Vũ trụ học	
0	tính phẳng, tức là không có độ cong, của vũ trụ
$1.2(1) \cdot 10^{26}$ m	khoảng cách của chân trời, tức là 'kích thước' của vũ trụ (nếu điều này có ý nghĩa)
$\rho_{de} = \Lambda c^4/(8\pi G) \approx 0.5\,\mathrm{nJ/m^3}$	giá trị và bản chất của mật độ năng lượng chân không, năng lượng tối hay hằng số vũ trụ
$(5 \pm 4) \cdot 10^{79}$	số lượng baryon trong vũ trụ (nếu điều này có ý nghĩa), tức là mật độ vật chất khả kiến trung bình trong vũ trụ
ρ_{dm}	mật độ và bản chất của vật chất tối
$f_0(1, ..., c.\ 10^{90})$	điều kiện ban đầu đối với *c.* 10^{90} trường của hạt trong vũ trụ (nếu điều này có ý nghĩa), bao gồm tính thuần nhất và tính đẳng hướng của phân bố vật chất và sự thăng giáng mật độ vào lúc khởi thuỷ của thiên hà
Các khái niệm không giải thích được bằng Thuyết tương đối tổng quát và Vũ trụ học	
c, G	nguồn gốc của các đơn vị Planck bất biến trong Thuyết tương đối tổng quát
$\mathrm{R} \times \mathrm{S}^3$	topo của vũ trụ
$G^{\mu\nu}$	nguồn gốc và bản chất của độ cong, metric và chân trời
$\delta W = 0$	nguồn gốc của nguyên lý tác dụng cực tiểu trong Thuyết tương đối tổng quát
$W = \int L_{GR}\,dt$	nguồn gốc của Lagrangian của Thuyết tương đối tổng quát

Danh sách thiên niên kỷ có nhiều điểm đáng chú ý. Đầu tiên, Cơ học lượng tử và Thuyết tương đối tổng quát đều không giải thích được các tính chất không giải thích được trong phần kia. Cả 2 lý thuyết không giúp gì được cho nhau; phần không giải thích được của cả 2 bên chỉ đơn giản là hợp của 2 bên. Thứ 2, trong cả 2 lý thuyết, chuyển động vẫn còn là sự thay đổi vị trí theo thời gian. Tóm lại cho đến lúc này, ta chưa đạt được mục tiêu: hiểu được chuyển động! Ta có thể mô tả chuyển động hoàn toàn chính xác nhưng không biết nó là cái gì. Câu hỏi cơ bản của ta vẫn còn: Thời gian và không gian là gì? Khối lượng là gì? Tích và các tính chất khác của vật thể là gì? Trường là gì? Tại sao mọi electron đều giống nhau?



HÌNH 181 Lịch sử đơn giản hoá của sự mô tả chuyển động trong vật lý bằng cách cho các giới hạn chuyển động vào trong mỗi mô tả. Các mũi tên cho ta thấy hằng số của thiên nhiên cần được thêm vào và tính đến để đạt được mức độ chính xác kế tiếp. (Điện tích e được chọn để đại diện cho cả 3 tích chuẩn riêng biệt.)

Trang 316

Ta cũng cần nhớ rằng danh sách thiên niên kỷ của các câu hỏi mở, Bảng 26, chứa các khái niệm hoàn toàn *khác nhau*. Điều này có nghĩa là vào lúc này của cuộc hành trình, có *nhiều điều* mà ta không hiểu. Việc tìm kiếm câu trả lời cần rất nhiều nỗ lực.

Mặt khác, danh sách thiên niên kỷ các tính chất không giải thích được của thiên nhiên cũng *ngắn*. Sự mô tả thiên nhiên mà cuộc thám hiểm của chúng ta đã tạo ra cho đến nay khá súc tích và chính xác. Ta chưa thấy những điểm không phù hợp với thực nghiệm. Nói cách khác, *trong thực tế*, ta đã mô tả chuyển động khá tốt. Việc đi xa hơn là điều không cần thiết nếu ta chỉ muốn cải thiện độ chính xác của phép đo. Việc đơn giản hoá danh sách trên chỉ quan trọng về mặt *nhận thức*. Vì lý do này, việc học Vật lý ở đại học thường dừng tại đây. Tuy vậy, như danh sách thiên kỷ cho thấy, mặc dù *không* thấy một sự sai lệch nào với thực nghiệm, ta vẫn *chưa* lên đến đỉnh Hành Sơn.

Hình lập phương Vật lý

Trang 8

Một tổng quan khác về sự tiến bộ và các vấn đề chưa giải quyết trong Vật lý, đã được trình bày trong phần giới thiệu, như ta thấy trong Hình 181: *Hình lập phương Vật lý*. Từ

góc thấp nhất, đại diện cho Vật lý Galilei và các chủ đề liên quan trong cuộc sống hằng ngày, 3 cạnh – có ghi các ký hiệu *c*, *G* và *ħ*, *e*, *k* – dẫn tới Thuyết hấp dẫn cổ điển, Thuyết tương đối đặc biệt và Thuyết lượng tử. Mỗi hằng số hàm ý một giới hạn chuyển động; mỗi lý thuyết tương ứng sẽ có *1* giới hạn để tăng thêm độ chính xác của mô tả. Từ các lý thuyết ở mức độ 2 này, các cạnh sẽ hướng lên tới Thuyết tương đối tổng quát, Thuyết trường lượng tử và Thuyết lượng tử có lực hấp dẫn. Mỗi lý thuyết ở mức độ 3 này sẽ có *2* giới hạn và độ chính xác sẽ tăng thêm.* Quyển sách này đã hoàn tất ở mức độ chính xác thứ 3. Chúng tôi phải nhấn mạnh rằng mỗi lý thuyết ở mức độ 2 và 3 đều *chính xác*, dù chỉ *trong phạm vi của nó*. Và mặc dù giới hạn của mỗi lĩnh vực là rõ ràng nhưng ta vẫn chưa thấy có sự khác biệt nào giữa thực nghiệm và lý thuyết.

Từ lý thuyết ở mức độ 3, các cạnh quy về góc cuối cùng còn thiếu: Lý thuyết về chuyển động (thống nhất) có đủ *các giới hạn* của thiên nhiên. Chỉ có lý thuyết này là đầy đủ và mô tả thiên nhiên một cách nhất quán. Vì ta đã biết mọi giới hạn chuyển động nên để tới mức độ cuối cùng này ta không cần các thí nghiệm mới. Ta không cần kiến thức mới. Ta chỉ phải tiến lên đúng hướng và suy nghĩ cẩn trọng. Và ta có thể bắt đầu từ 3 điểm khác nhau. Đây là chủ đề của quyển sau cùng trong cuộc thám hiểm của chúng ta.

Những cảm xúc mãnh liệt bắt nguồn từ Thuyết trường lượng tử và Thuyết tương đối tổng quát

Đôi khi việc giả vờ là cuộc phiêu lưu đã kết thúc ở giai đoạn mà ta vừa mới đến,** mức độ 3 của Hình 181 được xem là đẹp. Lý lẽ của việc đó là: nếu ta thay đổi giá trị của các
Trang 316 hằng số không giải thích được trong danh sách thiên niên kỷ của Bảng 26 chỉ một lượng
Xem 270 rất nhỏ thì thiên nhiên trông sẽ khác hoàn toàn với hình ảnh hiện tại. Thật vậy, các hệ quả này đã được nghiên cứu khá kỹ; một tổng quan được cho trong bảng sau.

BẢNG 27 Một số hệ quả của việc thay đổi các tính chất của thiên nhiên.

Biến động lực	Thay đổi	Kết quả
Các đại lượng địa phương, từ Thuyết lượng tử		
α_{em}	nhỏ đi:	Chỉ có các sao cuộc đời ngắn, nhỏ và nóng hơn; không có Mặt trời.
	lớn lên:	Mặt trời tối hơn, động vật chết vì bức xạ điện từ, rất nhiều phân rã proton, không có hành tinh, không có các vụ nổ của sao, không có sao và thiên hà.

* Dĩ nhiên là Hình 181 cho ta một cái nhìn đơn giản hoá về lịch sử Vật lý. Một sơ đồ chính xác hơn có thể sử dụng các mũi tên khác dành cho *ħ* (cùng với *k*) và *e*, tạo thành một hình lập phương 4 chiều. Tuy vậy, không phải tất cả các góc của nó đều có các lý thuyết trám chỗ (bạn có thể chứng minh điều này không?).
Câu đố 161 e Lẽ ra ta phải thêm vào các hằng số liên kết mạnh và yếu. Sơ đồ này sẽ ít lôi cuốn hơn nhiều. Và điều quan trọng nhất là các kết luận trong sách sẽ không thay đổi.

** Thực ra quan điểm này không mới. Chỉ có lý lẽ là thay đổi. Có lẽ nhà vật lý vĩ đại nhất, James Clerk
Xem 269 Maxwell, đã chống lại quan điểm này cách nay hơn 100 năm: 'Có một ý tưởng đã lan truyền khắp nơi trong vài năm nay là mọi hằng số vật lý quan trọng đã được ước tính gần đúng và việc còn lại của các nhà khoa học là tiến hành đo đạc để các phép đo chính xác hơn. [...] Lịch sử khoa học chứng tỏ rằng dù đang ở trong giai đoạn nỗ lực cải thiện độ chính xác của phép đo các đại lượng vật lý quen thuộc, thì khoa học cũng đang chuẩn bị nguyên liệu để chinh phục những vùng đất mới, nơi có nhiều điều vẫn còn là chưa biết nếu người ta hài lòng với những phương pháp thô sơ của những người tiên phong trước đó.'

BẢNG 27 (tiếp theo) Một số hệ quả của việc thay đổi các tính chất của thiên nhiên.

Biến động lực	Thay đổi	Kết quả
	+60 %:	Quark phân rã thành lepton.
	+200 %:	Lực đẩy Proton-proton khiến cho hạt nhân không thể hình thành.
α_w	−50 %:	Hạt nhân Carbon không bền.
	rất yếu:	Không có hydrogen, không có chu trình p-p trong ngôi sao, không có chu trình C-N-O.
	+2 %:	Không có proton từ các quark.
	$G_F m_e^2 \neq \sqrt{G m_e^2}$:	Không hoặc chỉ có helium trong vũ trụ.
	lớn hơn nhiều:	Không có các vụ nổ của sao, sao cháy nhanh hơn.
α_s	−9 %:	Không có deuteron, sao tối hơn.
	−1 %:	Không có cộng hưởng C, không có sự sống.
	+3.4 %:	Diproton bền, sao cháy nhanh hơn.
	lớn hơn nhiều:	Carbon không bền, hạt nhân nặng không bền, ung thư bạch cầu lan rộng.
hiệu khối lượng n-p	lớn hơn:	Neutron phân rã thành proton bên trong hạt nhân; không có các nguyên tố.
	nhỏ hơn:	Neutron tự do không bền, mọi proton biến thành neutron trong big bang; không có các nguyên tố.
	nhỏ hơn m_e:	Proton sẽ bắt electron, không có nguyên tử hydrogen, đời sống sao ngắn hơn nhiều.
m_l thay đổi:		
tỷ số khối lượng e-p	khác nhiều:	Không có phân tử.
	nhỏ hơn nhiều:	Không có chất rắn.
3 thế hệ	6-8:	Chỉ có helium trong thiên nhiên.
	>8:	Không có tự do tiệm cận và sự giam giữ.
Các đại lượng toàn cục, từ Thuyết tương đối tổng quát		
kích thước chân trời	nhỏ đi nhiều:	Không có người.
số baryon	khác nhiều:	không có sự trơn nhẵn.
	lớn lên nhiều:	Không có Thái dương hệ .
Điều kiện ban đầu thay đổi:		
Khối lượng Mặt trăng	nhỏ đi:	từ trường của Trái đất nhỏ; rất nhiều bức xạ vũ trụ; ung thư da trẻ em lan rộng.
Khối lượng Mặt trăng	lớn lên:	từ trường của Trái đất lớn; rất ít bức xạ vũ trụ; không có sự tiến hoá thành người.
Khối lượng Mặt trời	nhỏ đi:	Rất lạnh nên không thể có tiến hoá trong sự sống.

BẢNG 27 (tiếp theo) Một số hệ quả của việc thay đổi các tính chất của thiên nhiên.

Biến động lực	Thay đổi	Kết quả
Khối lượng Mặt trời	lớn lên:	Đời sống Mặt trời quá ngắn nên không thể có tiến hoá trong sự sống.
Khối lượng Mộc tinh	nhỏ đi:	Rất nhiều sao chổi đụng vào Trái đất; động vật tuyệt chủng.
Khối lượng Mộc tinh	lớn lên:	Rất ít sao chổi đụng vào Trái đất; không có Mặt trăng; khủng long không bị tiêu diệt.
Số vật trong đám mây Oort	ít đi:	Không có sao chổi; không có asteroid không đều; không có Mặt trăng; vẫn còn khủng long.
khoảng cách tới tâm thiên hà	nhỏ hơn:	Chuyển động của hành tinh sẽ không đều; hiểm hoạ siêu tân tinh.
tốc độ ban đầu của vũ trụ	+0.1 %:	Vũ trụ giãn nở nhanh hơn 1000 lần.
	−0.0001 %:	Vũ trụ sẽ suy sụp sau 10 000 năm.
mật độ năng lượng chân không	thay đổi 10^{-55}:	Không còn tính phẳng.
3 + 1 chiều	khác đi:	Không có nguyên tử, không có các hệ hành tinh.
Cấu trúc địa phương, từ Thuyết lượng tử		
đối xứng hoán vị	không có:	Không có vật chất.
đối xứng Lorentz	không có:	Không có truyền thông.
U(1)	khác đi:	không có nguyên lý Huygens, không thể *nhìn thấy* gì cả.
SU(2)	khác đi:	Không có hiện tượng phóng xạ, không Mặt trời, không sự sống.
SU(3)	khác đi:	Không có quark và hạt nhân bền.
Cấu trúc toàn cục, từ Thuyết tương đối tổng quát		
topo	khác:	không biết; có thể liên quan tới các bùng nổ tia γ hay các hình ảnh của sao ở các điểm xuyên tâm đối.

Xem 271
Câu đố 162 r

Ghi chú. Một số các nhà nghiên cứu suy đoán rằng toàn bộ Bảng 27 có thể cô đọng thành một câu: nếu có một tham số nào trong thiên nhiên bị thay đổi, vũ trụ sẽ có rất nhiều hoặc rất ít hố đen. Tuy vậy, bằng chứng của tóm tắt cô đọng này vẫn chưa có đủ. Nhưng nó là một giả thuyết đẹp.

Các tác dụng làm thay đổi thiên nhiên được liệt kê trong Bảng 27 cho ta một kinh nghiệm sâu sắc: ngay cả một thay đổi trong tính chất của thiên nhiên dù nhỏ bé nhất cũng không tương hợp với sự hiện hữu của chúng ta. Ý nghĩa của điều này là gì? Vội vã trả lời câu này là một điều nguy hiểm. Nhiều người đã rơi vào một trong các bẫy sau:

— Bẫy thứ nhất là suy diễn một cách sai lầm rằng các số không giải thích được và các tính chất khác trong danh sách thiên niên kỷ không cần hoặc không thể giải thích, tức là chúng được suy diễn từ các nguyên lý tổng quát hơn.
— Bẫy thứ 2 là suy diễn một cách sai lầm rằng vũ trụ đã *được tạo ra* hay *được thiết kế*.

— Bẫy thứ 3 là suy diễn một cách sai lầm rằng vũ trụ *đã được thiết kế cho con người.*
— Bẫy thứ 4 là suy diễn một cách sai lầm rằng vũ trụ là *1 trong nhiều vũ trụ*.

Tất cả các bẫy này đều là sự tin tưởng phi lý và sai lầm. Tất cả đều có chung một điểm là không căn cứ trên sự thực, làm nản chí các nhà nghiên cứu và nhắm tới mục đích bán được nhiều sách.

Bẫy thứ nhất bắt nguồn từ sự kết hợp của bi quan và đố kỵ; nó là một kiểu tư duy mơ mộng. Tư duy mơ mộng không có chỗ trong việc nghiên cứu chuyển động. Bẫy thứ 2 hoạt động được nhờ nhiều nhà vật lý đã phát biểu sai lầm về *sự tinh chỉnh* trong thiên nhiên. Nhiều nhà nghiên cứu đã đầu hàng vì tin vào 'sự sáng tạo' và không thể tránh xa những lý luận sai lầm chứa trong đó. Trước đây ta đã từng bàn về chúng.Bẫy thứ 3 thường được gọi sai là *nguyên lý vị nhân*. Tên gọi này là một sai lầm vì ta thấy rằng nguyên lý này không phân biệt được với nguyên lý loài khỉvà với yêu cầu đơn giản là các phát biểu đều phải dựa trên sự quan sát. Vào khoảng năm 2000, bẫy thứ 3 đã trở nên thời thượng giữa các lý thuyết gia về hạt bất đắc chí. Bẫy thứ 4, sự tin tưởng vào *Đa vũ trụ*, chỉ là quan điểm của một thiểu số nhưng họ cũng bán được nhiều sách vở. Phần lớn những người theo quan điểm này hiện diện trong các học viện. Và đó đúng là chỗ của họ.

Quyển VI, trang 374
Quyển III, trang 329
Quyển III, trang 336

Việc ngừng phiêu lưu lên đỉnh kiến thức vì một sự tin tưởng sai lầm vào lúc này cũng không khác gì không cất bước ngay từ đầu. Đã có những lựa chọn như vậy trong những người thiếu niềm đam mê học hỏi và trong những cộng đồng mà các thành viên của nó không thích lý luận. Việc tìm kiếm niềm tin thay vì tìm kiếm câu trả lời đồng nghĩa với việc từ bỏ cuộc hành trình trong khi giả vờ là đã lên tới đỉnh. Mỗi trường hợp như vậy đều là một bi kịch, có thể nhỏ hay lớn.

Đúng ra Bảng 27 chỉ cung cấp một thông điệp: mọi chứng cớ đều hàm ý rằng ta chỉ là một *phần nhỏ bé* của vũ trụ nhưng chúng ta đang *liên kết* với mọi mặt của nó. Bắt nguồn từ kích thước nhỏ bé của chúng ta và từ các mối liên kết với môi trường chung quanh, một thay đổi nhỏ bé bất kỳ cũng có thể làm ta biến mất giống như một giọt nước bị sóng lớn cuốn đi. Cuộc hành trình luôn nhắc nhở chúng ta về sự nhỏ bé và sự phụ thuộc này.

Trong cuộc phiêu lưu, việc chấp nhận thông điệp mạnh mẽ của Bảng 27 là một trong những thời điểm kinh hoàng, cảm động và phấn khích nhất. Nó chứng minh cho sự mênh mông của vũ trụ. Nó cũng cho ta thấy mức độ phụ thuộc của con người vào các mặt khác nhau của thiên nhiên. Nếu đã từng đối diện với các kinh nghiệm mạnh mẽ này, người ta sẽ phải quyết định là có tiếp tục theo đuổi cuộc thám hiểm này hay không. Dĩ nhiên điều này hoàn toàn là tự nguyện.

Câu đố 163 s

Điều gì đang chờ đợi chúng ta?

Giả sử bạn đã quyết định tiếp tục cuộc hành trình, việc hỏi xem điều gì đang chờ mình sẽ là một điều tự nhiên. Việc rút ngắn danh sách thiên niên kỷ về các điều không giải thích được của thiên nhiên, đã được cho trong Bảng 26, có nghĩa là *không thể có dữ liệu thực nghiệm bổ sung* để kiểm chứng phần mô tả sau cùng của thiên nhiên. Điều ta cần để đạt tới sự mô tả cuối cùng của chuyển động sẽ được suy ra từ dữ liệu thực nghiệm được cho trong danh sách thiên niên kỷ và không cần gì thêm. Nói cách khác, những thí nghiệm trong tương lai *sẽ không* giúp ích gì cho ta – trừ trường hợp chúng làm thay đổi điều gì đó trong danh sách thiên niên kỷ. Các thí nghiệm bằng máy gia tốc có thể làm được điều này đối với danh sách hạt hay các thí nghiệm thiên văn đối với các vấn đề topo. Óc tưởng tượng không bị hạn chế; điều may mắn là thiên nhiên cũng giống như

Trang 316

vậy.

Việc không có dữ liệu thực nghiệm mới đồng nghĩa với việc tiếp tục hành trình chỉ là một cuộc phiêu lưu *về mặt nhận thức*. Tuy vậy, bão tố đã nổi lên gần đỉnh Hành Sơn. Ta phải bước đi đầy thận trọng vì không còn sự dẫn đường nào khác ngoài lý luận của chúng ta. Đây không phải là một cuộc phiêu lưu hành động mà là một cuộc phiêu lưu trí tuệ. Và nó là một cuộc phiêu lưu đầy mê hoặc như ta sẽ thấy sau đây. Để có ấn tượng về những điều đang chờ đợi ta, chúng ta hãy nhắc lại các vấn đề còn lại dưới dạng năm câu đố đơn giản.

1 – Điều gì xác định *màu sắc*? Nói cách khác, hệ thức nào của thiên nhiên đã ấn định giá trị của hằng số cấu trúc tinh tế nổi tiếng? Giống như người hùng của quyển sách của Douglas Adams, các vật lý gia biết câu trả lời của câu hỏi lớn nhất này: đó là 137.036. Nhưng họ không biết về câu hỏi.

2 – Điều gì ấn định dung tích của một *ấm trà*? Nó thường được cho dưới dạng kích thước luỹ thừa 3. Nhưng tại sao chỉ có 3 chiều? Tại sao dung tích của ấm trà bị giới hạn theo cách này?

3 – Democritus *có đúng* hay không? Cuộc phiêu lưu của chúng ta đã khẳng định ở điểm này trong phát biểu của ông: thiên nhiên thực sự được mô tả rất tốt nhờ khái niệm *hạt* và *chân không*. Ở thang đo lớn, Thuyết tương đối đã thêm vào một chân trời, và ở thang đo nhỏ, Thuyết lượng tử đã thêm vào năng lượng chân không và sự sinh cặp. Tuy vậy, cả 2 lý thuyết đều *giả sử* về sự hiện hữu của các hạt, của không-thời gian mà không *tiên đoán* được chúng. Tệ hơn nữa, cả 2 lý thuyết đều thất bại hoàn toàn trong việc tiên đoán sự hiện hữu của một tính chất *bất kỳ* của không-thời gian – như thứ nguyên của chúng – hay của các hạt – như khối lượng và các lượng tử số. Khá nhiều thiếu sót.

4 – Democritus *có sai* không? Người ta thường nói rằng Mô hình chuẩn chỉ có khoảng 20 tham số chưa biết; sai lầm phổ biến này phủ nhận khoảng 10^{93} điều kiện ban đầu! Để có một ý tưởng về bài toán này, ta hãy ước tính một cách đơn giản số N là các trạng thái khả hữu của tất cả các hạt trong vũ trụ bằng công thức

$$N = n\,v\,d\,p\,f \tag{133}$$

trong đó n là số hạt, v là số biến (vị trí, động lượng, spin), d là số giá trị khác nhau mà mỗi đại lượng có thể có (bị giới hạn tối đa 61 chữ số thập phân), p là số điểm không-thời gian khả kiến (khoảng 10^{183}) và f là một thừa số biểu diễn số lượng của tất cả các điều kiện ban đầu thực sự độc lập với nhau. Ta kiếm được số trạng thái khả hữu của tất cả các hạt trong vũ trụ là:

$$N = 10^{92} \cdot 8 \cdot 10^{61} \cdot 10^{183} \cdot f = 10^{336} \cdot f \tag{134}$$

từ đó có 10^{93} điều kiện ban đầu phải được giải thích. Nhưng ta không có lời giải thích nào. Tệ hơn, còn một vấn đề phụ là ta không biết chút gì về f. Giá trị của nó có thể là 0, nếu tất cả dữ liệu phụ thuộc nhau, hay 1, nếu không phụ thuộc. Ta cũng cần nhớ rằngcác điều kiện ban đầu đối với vũ trụ không được xác định; như vậy f sẽ không xác định và không có trị số nào hết! Dù gì đi nữa thì ta cũng cần hiểu cách để tất cả các hạt khả kiến kiếm được 10^{93} trạng thái như hiện nay.

Quyển IV, trang 170

5 – Nỗ lực của chúng ta tới thời điểm này có *vô ích* hay không? Ngay từ lúc bắt đầu cuộc thám hiểmta đã nhớ rằng trong Vật lý cổ điển, không gian và thời gian được xác định bằng cách sử dụng vật chất, trong khi vật chất lại được xác định bằng cách sử dụng không-thời gian. Hàng trăm năm của Thuyết tương đối tổng quát và Thuyết lượng tử cùng hàng chục thiên tài đã không giải quyết được nghịch lý xưa cũ này. Vấn đề vẫn còn đó trên cuộc hành trình của chúng ta vào lúc này và bạn có thể tự kiểm tra điều đó.

Quyển I, trang 437

Câu đố 164 e

Câu trả lời cho 5 câu đố này xác định mục tiêu của cuộc hành trình: đỉnh Hành Sơn. Việc trả lời 5 câu đố đồng nghĩa với việc biết tường tận *mọi điều* về chuyển động. Nó cũng có nghĩa là tìm thấy câu trả lời tối hậu của câu hỏi đã đưa chúng ta tới đây:

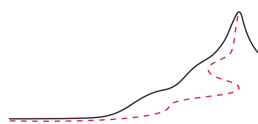
▷ Chuyển động là gì?

Tóm lại, cuộc hành trình của chúng ta, nhằm tìm ra bản chất của chuyển động, chỉ thực sự trở nên thú vị kể từ lúc này trở đi!

> “Đó là lý do tại sao Leucippus và Democritus, những người nói rằng nguyên tử luôn luôn chuyển động trong chân không và không bị giới hạn, phải cho biết chuyển động là gì và bản chất của chuyển động tự nhiên là gì.”
>
> Aristotle, *Treaty of the Heaven*

Xem 272





Phụ lục 13

Đơn vị, sự đo lường và các hằng số

Sự đo lường đồng nghĩa với việc so sánh các đại lượng cần đo với các chuẩn đo lường. Các chuẩn đo lường dựa trên các *đơn vị*. Nhiều hệ đơn vị khác nhau đã được sử dụng trên khắp thế giới. Phần lớn các chuẩn đo lường này được trao quyền cho một tổ chức phụ trách. Việc trao quyền này có khi bị lạm dụng và ngày nay việc này đã xảy ra, thí dụ như trong kỹ nghệ máy tính cũng như trong quá khứ xa xưa. Giải pháp cho cả hai trường hợp này thì giống nhau: tạo ra chuẩn đo lường có tính độc lập và toàn cầu. Đối với các đơn vị đo lường, việc này đã diễn ra vào thế kỷ 18: để tránh việc các tổ chức độc đoán lạm dụng, để loại bỏ các vấn đề các chuẩn đo lường khác nhau, thay đổi và không thể tái lập được, và – điều này không phải chuyện đùa – để đơn giản hoá việc thu thuế, tạo nên sự công bằng, một nhóm các khoa học gia, chính trị gia và kinh tế gia đồng ý tạo ra một bộ đơn vị. Nó được gọi là *Système International d'Unités*, Hệ đơn vị quốc tế, viết tắt là *SI*, và được xác định bởi một Hiệp ước quốc tế, 'Công ước về Mét'. Các đơn vị được bảo dưỡng bởi một tổ chức quốc tế, 'Đại hội đồng về cân đo', và các tổ chức con của nó, 'Uỷ ban quốc tế về cân đo' và 'Văn phòng quốc tế về cân đo' (BIPM). Tất cả đều
Xem 368
được tổ chức trước Cách mạng Pháp.

Đơn vị SI

Tất cả các đơn vị SI đều được xây dựng từ 7 *đơn vị cơ bản*, có định nghĩa chính thức, được dịch từ tiếng Pháp sang tiếng Anh như dưới đây, cùng với ngày tháng định nghĩa:

- '*giây* là khoảng thời gian của 9 192 631 770 chu kỳ của bức xạ tương ứng với sự chuyển dời giữa hai mức siêu tinh tế của trạng thái cơ bản của nguyên tử caesium 133.' (1967) Định nghĩa 2019 thì tương đương nhưng ít rõ ràng hơn.*
- '*mét* là chiều dài của quãng đường trong chân không mà ánh sáng đi được trong khoảng thời gian 1/299 792 458 s.' (1983) Định nghĩa 2019 thì tương đương nhưng ít rõ ràng hơn.*
- '*kilogam*, ký hiệu kg, là đơn vị SI của khối lượng. Nó được định nghĩa bằng cách lấy trị số của hằng số Planck h bằng $6.626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ khi được biểu diễn theo đơn vị J · s hay $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$.' (2019)'*
- '*ampere*, ký hiệu A, là đơn vị SI của dòng điện. Nó được định nghĩa bằng cách lấy trị số của điện tích nguyên tố e bằng $1.602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ khi được biểu diễn theo đơn vị C hay A · s.' (2019) * Định nghĩa này tương đương với: 1 ampere là $6.241\,509\,074... \cdot 10^{18}$ điện tích nguyên tố mỗi giây.
- '*kelvin*, ký hiệu K, là đơn vị SI của nhiệt độ nhiệt động lực. Nó được định nghĩa bằng cách lấy trị số của hằng số Boltzmann *k* bằng $1.380\,649 \cdot 10^{-23}$ khi được biểu diễn theo

đơn vị J/K.' (2019)*

- '*mole*, ký hiệu mol, là đơn vị SI của lượng chất. Một mol chứa đúng $6.022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ thực thể sơ cấp.' (2019)*
- '*candela* là cường độ sáng, theo hướng đã cho, của một nguồn phát ra bức xạ đơn sắc có tần số $540 \cdot 10^{12}$ hertz và có cường độ bức xạ theo hướng đó bằng (1/683) w/sr.' (1979) Định nghĩa 2019 thì tương đương nhưng ít rõ ràng hơn.*

Ta nên chú ý là cả hai đơn vị thời gian và chiều dài đều được định nghĩa như các tính chất nào đó của một mẫu tiêu chuẩn của chuyển động, cụ thể là ánh sáng. Đại hội đồng về cân đo cũng nhấn mạnh rằng việc quan sát chuyển động là một *điều kiện tiên quyết* để định nghĩa và xây dựng không gian và thời gian. *Chuyển động là cơ sở cho mọi quan sát và mọi phép đo.* Cũng cần nói thêm, việc sử dụng ánh sáng trong các định nghĩa đã được Jacques Babinet đề nghị vào năm 1827.

Từ những đơn vị cơ bản này, tất cả các đơn vị khác được định nghĩa bằng các phép nhân và chia. Như vậy tất cả các đơn vị SI đều có các tính chất sau đây:

- Các đơn vị SI tạo thành một hệ đơn vị có *độ chính xác cao nhất*: tất cả các đơn vị được định nghĩa với độ chính xác cao hơn độ chính xác của các phép đo thường dùng. Hơn nữa, độ chính xác của các định nghĩa được cải tiến thường xuyên. Sai số tương đối hiện nay của định nghĩa của giây vào khoảng 10^{-14}, của met vào khoảng 10^{-10}, của kilogam vào khoảng 10^{-9}, của ampere là 10^{-7}, của mole ít hơn 10^{-6}, của kelvin là 10^{-6} và của candela là 10^{-3}.
- Các đơn vị SI tạo thành một hệ đơn vị *tuyệt đối*: mọi đơn vị đều được định nghĩa sao cho người ta có thể tái lập chúng trong những phòng thí nghiệm được trang bị thích hợp, một cách độc lập, với độ chính xác cao. Điều này nhằm loại trừ tối đa các sai sót hay lạm dụng của các tổ chức định chuẩn. Đúng ra đơn vị SI hiện nay rất gần với các đơn vị tự nhiên của Planck mà ta sẽ trình bày sau đây. Trong thực tế, SI hiện nay là một tiêu chuẩn quốc tế dùng để xác định trị số của 7 hằng số $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, c, $\hbar$, e, k, N_{A} và K_{cd}. Sau hơn 200 năm bàn bạc, CGPM còn rất ít việc để làm.
- Các đơn vị SI tạo thành một hệ đơn vị *thực tế*: các đơn vị cơ bản là các đại lượng có kích thước thông thường. Các đơn vị thường dùng có tên và cách viết tắt tiêu chuẩn. Danh sách đầy đủ chỉ bao gồm 7 đơn vị cơ bản, các đơn vị phụ, các đơn vị dẫn xuất và các đơn vị được thêm vào.

Có hai đơn vị SI *phụ*: đơn vị đo góc (phẳng), được định nghĩa là tỷ số của chiều dài cung/bán kính, gọi là *radian* (rad). Góc khối được định nghĩa là tỷ số diện tích đối diện/bình phương bán kính, gọi là *steradian* (sr).

Các đơn vị *dẫn xuất* có tên riêng chính thức bằng tiếng Anh, không viết hoa và dấu nhấn, là:

---

* Ký hiệu của 7 đơn vị là s, m, kg, A, K, mol và cd. Định nghĩa chính thức có đầy đủ ở địa chỉ www.bipm.org. Để biết thêm chi tiết về các mức năng lượng của nguyên tử caesium, hãy tham khảo một quyển sách về vật lý nguyên tử. Thang đo nhiệt độ Celsius θ được định nghĩa như sau: $\theta/°\text{C} = T/\text{K} - 273.15$; hãy để ý có một sai biệt nhỏ với con số xuất hiện trong định nghĩa của kelvin. Trong định nghĩa của candela, tần số ánh sáng tương ứng với 555.5 nm, tức là màu lục, là bước sóng nhạy nhất đối với mắt.

Xem 274

** Jacques Babinet (1794–1874), vật lý gia Pháp, người đã công bố các công trình quang học quan trọng.

Tên	Viết tắt
hertz	Hz = 1/s
pascal	$Pa = N/m^2 = kg/(m\,s^2)$
watt	$W = kg\,m^2/s^3$
volt	$V = kg\,m^2/(As^3)$
ohm	$\Omega = V/A = kg\,m^2/(A^2s^3)$
weber	$Wb = Vs = kg\,m^2/(As^2)$
henry	$H = Vs/A = kg\,m^2/(A^2s^2)$
lumen	lm = cd sr
becquerel	Bq = 1/s
sievert	$Sv = J/kg = m^2/s^2$

Tên	Viết tắt
newton	$N = kg\,m/s^2$
joule	$J = Nm = kg\,m^2/s^2$
coulomb	C = As
farad	$F = As/V = A^2s^4/(kg\,m^2)$
siemens	$S = 1/\Omega$
tesla	$T = Wb/m^2 = kg/(As^2) = kg/(Cs)$
độ Celsius	°C (xem định nghĩa của kelvin)
lux	$lx = lm/m^2 = cd\,sr/m^2$
gray	$Gy = J/kg = m^2/s^2$
katal	kat = mol/s

Các đơn vị không thuộc SI *được thêm vào* là *phút*, *giờ*, *ngày* (đối với thời gian), *độ* $1° = \pi/180$ rad, *phút* $1' = \pi/10\,800$ rad, *giây* $1'' = \pi/648\,000$ rad (đối với góc), *lít*, và *tấn*. Các đơn vị khác đều bị tránh không sử dụng.

Người ta làm tăng thêm tính thực tế cho tất cả các đơn vị SI bằng cách đưa ra thêm các tên và cách viết tắt tiêu chuẩn của các luỹ thừa của 10, mà ta gọi là *các tiền tố*:*

Tên luỹ thừa		
10^{1}	deca	da
10^{2}	hecto	h
10^{3}	kilo	k
10^{6}	Mega	M
10^{9}	Giga	G
10^{12}	Tera	T
10^{15}	Peta	P

Tên luỹ thừa		
10^{-1}	deci	d
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	milli	m
10^{-6}	micro	µ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	femto	f

Tên luỹ thừa					
10^{18}	Exa	E	10^{-18}	atto	a
10^{21}	Zetta	Z	10^{-21}	zepto	z
10^{24}	Yotta	Y	10^{-24}	yocto	y
không chính thức:			Xem 370		
10^{27}	Xenta	X	10^{-27}	xenno	x
10^{30}	Wekta	W	10^{-30}	weko	w
10^{33}	Vendekta	V	10^{-33}	vendeko	v
10^{36}	Udekta	U	10^{-36}	udeko	u

- Các đơn vị SI tạo thành một hệ đơn vị *đầy đủ*: chúng bao gồm một cách có hệ thống tất cả các biến động lực trong vật lý. Thêm nữa, chúng còn điều chỉnh luôn các đơn vị đo lường cho tất cả các khoa học khác.
- Các đơn vị SI tạo thành một hệ đơn vị *phổ dụng*: chúng còn được sử dụng trong lĩnh vực thương mại, kỹ nghệ, giáo dục, nghiên cứu và trong gia đình. Chúng còn có thể được các nền văn minh ngoài Trái đất, nếu có, sử dụng.

* Người ta đã sáng chế ra một số tên (yocto nghe giống như từ Latin *octo* 'tám', zepto nghe giống như từ Latin *septem*, yotta và zetta thì tương tự, exa và peta nghe giống như từ Hy Lạp ἑξάκις và πεντάκις là '6 lần' và '5 lần', các tên không chính thức nghe giống như các từ Hy Lạp có nghĩa là 9, 10, 11 và 12); một số tên là từ tiếng Đan Mạch/Na Uy (atto do *atten* '18', femto do *femten* '15'); một số tên là từ tiếng Latin (*mille* là '1000', *centum* là '100', *decem* là '10', *nanus* là 'lùn'); một số tên là từ tiếng Ý (*piccolo* là 'nhỏ'); một số tên là từ tiếng Hy Lạp (micro do μικρός là 'nhỏ', deca/deka do δέκα là '10', hecto do ἑκατόν là '100', kilo do χίλιοι là '1000', mega do μέγας là 'lớn', giga doγίγας là 'khổng lồ', tera do τέρας là 'quái vật').

Câu đố 165 e Hãy dịch câu: Tôi đã bị kẹt xe mất một micro-thế kỷ để đi một quãng đường một picoparsec và tốn hết 2/10 milimét vuông nhiên liệu.

▪ Các đơn vị SI tạo thành một hệ đơn vị *nhất quán*: tích hay thương của 2 đơn vị SI cũng là một đơn vị SI. Về nguyên tắc điều này có nghĩa là có thể dùng cùng một chữ viết tắt ‘SI’ cho mọi đơn vị.

Các đơn vị SI không phải là tập hợp khả hữu duy nhất có thể thoả mãn các yêu cầu trên nhưng chúng là hệ đơn vị đang có, duy nhất làm được điều đó.*

Ý nghĩa của phép đo

Câu đố 166 e

Mỗi phép đo là một sự so sánh với một chuẩn đo. Do đó, một phép đo bất kỳ đòi hỏi có *vật chất* để hiện thực hoá chuẩn đo (ngay cả chuẩn vận tốc) và *bức xạ* để hoàn thành việc so sánh. Như vậy khái niệm đo đã giả sử rằng phải có vật chất và bức xạ và chúng phải tách biệt nhau.

Mỗi phép đo là một sự so sánh. Như vậy đo bao hàm việc phải có không gian và thời gian và chúng phải khác nhau.

Mỗi phép đo sinh ra một kết quả đo. Do đó mỗi phép đo phải có *nơi lưu trữ* kết quả. Như vậy quá trình đo dẫn tới sự phân biệt trạng thái trước và sau khi đo. Nói cách khác, mỗi phép đo là một quá trình *bất thuận nghịch*.

Mỗi phép đo là một quá trình chiếm một lượng thời gian và không gian nào đó.

Các tính chất này tuy đơn giản nhưng quan trọng. Hãy coi chừng xem có ai phủ nhận chúng hay không.

Đơn vị tự nhiên của Planck

Vì dạng chính xác của nhiều phương trình phụ thuộc hệ đơn vị được sử dụng, các nhà vật lý lý thuyết thường sử dụng các hệ đơn vị được tối ưu hoá cho việc tạo ra các phương trình đơn giản. Các đơn vị được chọn và giá trị của các hằng số trong tự nhiên có liên hệ với nhau. Trong vật lý vi mô, người ta thường sử dụng *các đơn vị tự nhiên của Planck*. Chúng được định nghĩa bằng cách đặt $c = 1, \hbar = 1, G = 1, k = 1, \varepsilon_0 = 1/(4\pi)$ và $\mu_0 = 4\pi$. Như vậy các đơn vị của Planck được định nghĩa từ tổ hợp của các hằng số cơ bản; sự tương ứng của các đơn vị đó với các đơn vị cơ bản SI được cho trong Bảng 29.** Bảng này cũng hữu ích cho việc chuyển đổi các phương trình được viết theo các đơn vị tự nhiên trở lại dạng theo đơn vị SI: chỉ cần thay thế mỗi đại lượng X bằng X/X_{Pl}.

* Ngoài các đơn vị quốc tế, cũng có các đơn vị mang tính *địa phương*. Phần lớn các đơn vị địa phương, vẫn còn được sử dụng, có nguồn gốc La Mã. Dặm xuất phát từ *milia passum*, thường là 1000 bước (đôi) dài khoảng 1480 mm mỗi bước; ngày nay một hải lý, đã từng được định nghĩa là 1 phút cung trên Mặt đất, có chiều dài chính xác là 1852 m. Inch xuất phát từ *uncia/onzia* (1/12 của một foot). Pound (xuất phát từ *pondere* ‘cân’) được dịch từ *libra* – cái cân – cũng là nguồn gốc của chữ viết tắt lb. Ngay cả thói quen đếm từng tá thay vì chục cũng có nguồn gốc La Mã. Những đơn vị này và các đơn vị buồn cười khác – như hệ đơn vị mà tên các đơn vị đều bắt đầu bằng chữ ‘f’, và hệ dùng furlong/fortnight làm đơn vị vận tốc – bây giờ đã chính thức được định nghĩa là bội số của đơn vị SI.

** Các đơn vị tự nhiên x_{Pl} được cho ở đây mà ngày nay thường được sử dụng, là các đơn vị được định nghĩa bằng cách sử dụng hằng số $\hbar$ và, như Planck đã làm lúc ban đầu, sử dụng hằng số $h = 2\pi\hbar$. Các đơn vị điện từ cũng có thể được định nghĩa bằng các hệ số khác hơn $4\pi\varepsilon_0$ trong các biểu thức: thí dụ như sử dụng $4\pi\varepsilon_0\alpha$, với *hằng số cấu trúc tinh tế* α, sẽ cho $q_{\text{Pl}} = e$. Để giải thích cho các con số giữa các dấu ngoặc, hãy xem dưới đây.

Quyển IV, trang 197

BẢNG 29 Các đơn vị tự nhiên của Planck (chưa hiệu chỉnh).

Tên	Định nghĩa				Giá trị
Các đơn vị cơ bản					
Chiều dài Planck	l_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar G/c^3}$	=	$1.616\,0(12) \cdot 10^{-35}$ m
Thời gian Planck	t_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar G/c^5}$	=	$5.390\,6(40) \cdot 10^{-44}$ s
Khối lượng Planck	m_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar c/G}$	=	$21.767(16)$ µg
Cường độ Planck	I_{Pl}	=	$\sqrt{4\pi\varepsilon_0 c^6/G}$	=	$3.479\,3(22) \cdot 10^{25}$ A
Nhiệt độ Planck	T_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar c^5/(Gk^2)}$	=	$1.417\,1(91) \cdot 10^{32}$ K
Các đơn vị không quan trọng					
Vận tốc Planck	v_{Pl}	=	c	=	0.3 Gm/s
Moment động lượng Planck	L_{Pl}	=	$\hbar$	=	$1.1 \cdot 10^{-34}$ Js
Tác dụng Planck	S_{aPl}	=	$\hbar$	=	$1.1 \cdot 10^{-34}$ Js
Entropy Planck	S_{ePl}	=	k	=	13.8 yJ/K
Các đơn vị hợp thành					
Mật độ khối lượng Planck	ρ_{Pl}	=	$c^5/(G^2\hbar)$	=	$5.2 \cdot 10^{96}$ kg/m^3
Năng lượng Planck	E_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar c^5/G}$	=	2.0 GJ = $1.2 \cdot 10^{28}$ eV
Động lượng Planck	p_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar c^3/G}$	=	6.5 Ns
Công suất Planck	P_{Pl}	=	c^5/G	=	$3.6 \cdot 10^{52}$ W
Lực Planck	F_{Pl}	=	c^4/G	=	$1.2 \cdot 10^{44}$ N
Áp suất Planck	p_{Pl}	=	$c^7/(G\hbar)$	=	$4.6 \cdot 10^{113}$ Pa
Gia tốc Planck	a_{Pl}	=	$\sqrt{c^7/(\hbar G)}$	=	$5.6 \cdot 10^{51}$ m/s^2
Tần số Planck	f_{Pl}	=	$\sqrt{c^5/(\hbar G)}$	=	$1.9 \cdot 10^{43}$ Hz
Điện tích Planck	q_{Pl}	=	$\sqrt{4\pi\varepsilon_0 c\hbar}$	=	1.9 aC = 11.7 e
Điện áp Planck	U_{Pl}	=	$\sqrt{c^4/(4\pi\varepsilon_0 G)}$	=	$1.0 \cdot 10^{27}$ V
Điện trở Planck	R_{Pl}	=	$1/(4\pi\varepsilon_0 c)$	=	30.0 Ω
Điện dung Planck	C_{Pl}	=	$4\pi\varepsilon_0 \sqrt{\hbar G/c^3}$	=	$1.8 \cdot 10^{-45}$ F
Độ tự cảm Planck	L_{Pl}	=	$1/(4\pi\varepsilon_0) \sqrt{\hbar G/c^7}$	=	$1.6 \cdot 10^{-42}$ H
Điện trường Planck	E_{Pl}	=	$\sqrt{c^7/(4\pi\varepsilon_0 \hbar G^2)}$	=	$6.5 \cdot 10^{61}$ V/m
Mật độ từ thông Planck	B_{Pl}	=	$\sqrt{c^5/(4\pi\varepsilon_0 \hbar G^2)}$	=	$2.2 \cdot 10^{53}$ T

Các đơn vị tự nhiên còn quan trọng vì lý do khác: khi một đại lượng được gọi một cách tuỳ tiện là 'vô cùng nhỏ (hay lớn)', thì cách phát biểu đúng là 'nhỏ (hay lớn) như đơn vị Planck có hiệu chỉnh tương ứng'. Như đã giải thích trong sách và đặc biệt là trong phần cuối, không thể gọi thay thế như vậy vì hầu như mọi đơn vị Planck đều cung cấp, trong phạm vi một hệ số hiệu chỉnh bậc 1, một cực trị cho biến động lực tương ứng – một số giới hạn trên và một số giới hạn dưới. Điều không may là các hệ số này chưa được nhiều người biết đến. Ta có thể kiếm được cực trị chính xác cho mỗi biến động lực trong thiên

Quyển VI, trang 37

nhiên khi G được thay thế bằng $4G$ và $4\pi\varepsilon_0$ thay bằng $4\pi\varepsilon_0\alpha$ trong tất cả các đại lượng Planck. Những cực trị này, hay *những đơn vị Planck được hiệu chỉnh*, là những *đơn vị tự nhiên thực sự*. Chỉ có một số đại lượng quảng tính mới có thể vượt qua những cực trị này. (Bạn có thể tìm ra chúng không?)

Câu đố 167 s

Các hệ đơn vị khác

Một mục tiêu nghiên cứu quan trọng trong Vật lý năng lượng cao là tính toán cường độ của mọi tương tác; do đó việc cho hằng số hấp dẫn G bằng đơn vị như trong hệ đơn vị Planck là điều không thực tiễn. Vì lý do này, các nhà vật lý năng lượng cao thường đặt $c = \hbar = k = 1$ và $\mu_0 = 1/\varepsilon_0 = 4\pi$,* và để lại hằng số hấp dẫn G trong các phương trình.

Trong hệ đơn vị này chỉ có một đơn vị cơ bản nhưng ta được tự do lựa chọn. Thường chiều dài chuẩn được chọn làm đơn vị cơ bản, là nguyên mẫu của đại lượng được đo. Các biến động lực vật lý quan trọng nhất liên hệ với nhau như sau

$$\begin{aligned}
1/[l^2] &= [E]^2 = [F] = [B] = [E_{\text{electric}}] \,, \\
1/[l] &= [E] = [m] = [p] = [a] = [f] = [I] = [U] = [T] \,, \\
1 &= [v] = [q] = [e] = [R] = [S_{\text{action}}] = [S_{\text{entropy}}] = \hbar = c = k = [\alpha] \,, \\
[l] &= 1/[E] = [t] = [C] = [L] \quad \text{và} \\
[l]^2 &= 1/[E]^2 = [G] = [P]
\end{aligned} \tag{135}$$

trong đó $[x]$ là đơn vị của đại lượng x. Sử dụng cùng một đơn vị cho thời gian, điện dung và tự cảm thì không hợp khẩu vị của mọi người nên các nhà điện học không sử dụng hệ đơn vị này.**

Thường thường để gây ấn tượng về năng lượng cần để quan sát một hiệu ứng đang nghiên cứu, một năng lượng chuẩn được chọn làm đơn vị cơ bản. Trong vật lý hạt, đơn vị năng lượng phổ biến nhất là *electron volt* eV, được định nghĩa là động năng mà một electron có được khi được gia tốc dưới hiệu điện thế 1 volt (có lẽ tên 'proton volt' tốt hơn). Do đó ta có $1\,\text{eV} = 1.6 \cdot 10^{-19}$ J, hay

$$1\,\text{eV} \approx \tfrac{1}{6}\,\text{aJ} \tag{136}$$

thì dễ nhớ hơn. Sự đơn giản hoá $c = \hbar = 1$ cho kết quả là $G = 6.9 \cdot 10^{-57}\,\text{eV}^{-2}$ và cho phép ta sử dụng đơn vị eV cho khối lượng, động lượng, nhiệt độ, tần số, thời gian và chiều dài, với sự tương ứng của từng đơn vị là $1\,\text{eV} \equiv 1.8 \cdot 10^{-36}\,\text{kg} \equiv 5.4 \cdot 10^{-28}\,\text{Ns} \equiv 242\,\text{THz} \equiv 11.6\,\text{kK}$ và $1\,\text{eV}^{-1} \equiv 4.1\,\text{fs} \equiv 1.2\,\mu\text{m}$.

Câu đố 168 e

* Các định nghĩa khác của các hằng số tỷ lệ trong Điện động lực học dẫn tới hệ đơn vị Gauss thường được sử dụng trong các tính toán lý thuyết, hệ đơn vị Heaviside–Lorentz, hệ đơn vị tĩnh điện và hệ đơn vị điện từ.

Xem 154

** Trong danh sách này, l là chiều dài, E là năng lượng, F là lực, E_{electric} là điện trường và B là từ trường, m là khối lượng, p là động lượng, a là gia tốc, f là tần số, I là cường độ dòng điện, U là hiệu thế, T là nhiệt độ, v là tốc độ, q là điện tích, R là điện trở, P là công suất, G là hằng số hấp dẫn.

Trang web www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/general/units_en.html cung cấp một công cụ để chuyển đổi đơn vị.

Các nhà nghiên cứu Thuyết tương đối tổng quát thường sử dụng hệ đơn vị khác, trong đó *bán kính Schwarzschild* $r_s = 2Gm/c^2$ được sử dụng để đo khối lượng bằng cách đặt $c = G = 1$. Trong trường hợp này, khối lượng và chiều dài có *cùng* thứ nguyên và $\hbar$ có thứ nguyên của diện tích.

Để có một cảm nhận về đơn vị eV, các hệ thức sau đây khá hữu dụng. Nhiệt độ phòng, thường được lấy là 20°C hay 293 K, tương ứng với động năng của mỗi hạt là 0.025 eV hay 4.0 zJ. Năng lượng lớn nhất của hạt đo được cho đến nay thuộc về tia vũ trụ có năng
Xem 155 lượng $3 \cdot 10^{20}$ eV hay 48 J. Dưới mặt đất, người ta đã xây dựng được một máy gia tốc có thể tạo ra năng lượng khoảng 105 GeV hay 17 nJ cho electron và phản electron và một máy khác có thể tạo ra năng lượng 14 TeV hay 2.2 μJ cho proton sắp được xây dựng xong. Cả 2 máy đều thuộc về CERN ở Geneva và có chu vi 27 km.

Cho đến nay nhiệt độ thấp nhất mà ta đã đo được là 280 pK, trong một nhóm các hạt
Xem 156 nhân rhodium được giữ trong một hệ làm lạnh đặc biệt. Bên trong của máy làm lạnh đó có thể là điểm lạnh nhất trong toàn thể vũ trụ. Động năng của mỗi hạt tương ứng với nhiệt độ đó cũng là giá trị nhỏ nhất mà người ta đã từng đo được: nó tương ứng với 24 feV hay 3.8 vJ = $3.8 \cdot 10^{-33}$ J. Đối với các hạt cô lập, kỷ lục hình như thuộc về neutron: người ta đã đạt tới động năng nhỏ đến 10^{-7} eV, tương ứng với bước sóng de Broglie 60 nm.

Các câu đố vui và lạ về đơn vị

Chiều dài Planck gần bằng bước sóng de Broglie $\lambda_B = h/mv$ của một người thả bộ trên
Xem 279 đường (m = 80 kg, v = 0.5 m/s); do đó chuyển động này nhanh chóng được gọi là ‘Cuộc đi dạo của Planck.”

* *

Khối lượng Planck bằng khối lượng của khoảng 10^{19} proton. Khối lượng này gần bằng khối lượng của thai nhi khoảng 10 ngày tuổi.

* *

Những đại lượng được đo chính xác nhất trong thiên nhiên là tần số của các pulsar
Xem 158 millisecond, tần số của vạch chuyển mức hẹp của một số nguyên tử và hằng số Rydberg của *nguyên tử* hydrogen, tất cả đều được đo với độ chính xác như trong định nghĩa của giây. Sự chuyển mức của caesium dùng để định nghĩa giây có một bề rộng hữu hạn làm giới hạn độ chính xác: giới hạn này có khoảng 14 chữ số.

* *

Đồng hồ chính xác nhất mà người ta đã từng tạo ra, sử dụng vi ba, có độ ổn định 10^{-16}
Xem 159 trong thời gian chạy là 500 s. Đối với khoảng thời gian dài hơn, kỷ lục năm 1997 cỡ 10^{-15};
Xem 160 nhưng các giá trị khoảng 10^{-17} nằm trong khả năng của công nghệ. Độ chính xác của đồng hồ bị giới hạn vì nhiễu nếu thời gian đo ngắn và vì sự kéo theo nếu thời gian đo dài, tức là do các tác dụng của hệ thống. Vùng ổn định cao nhất phụ thuộc loại đồng hồ; thường là trong khoảng 1 ms đối với đồng hồ quang và 5000 s đối với maser. Pulsar là loại đồng hồ duy nhất mà ta chưa biết vùng ổn định của nó; nó đã nằm đó hơn 20 năm, là thời gian kể từ lúc phát hiện đến khi các dòng này được viết ra.

* *

Thời gian ngắn nhất mà người ta đã đo được là thời gian sống của các hạt ‘sơ cấp’. Đặc
Xem 161 biệt, người ta đã đo được thời gian sống của D mesons là nhỏ hơn 10^{-23} s. Những thời gian như vậy được đo bằng cách sử dụng một buồng bọt, nơi người ta ghi lại ảnh của vết

Câu đố 169 s đường đi. Bạn có thể ước lượng các đoạn đường này dài bao nhiêu không? (Đây là câu hỏi mẹo – nếu chiều dài mà bạn tìm ra không thể quan sát được bằng một kính hiển vi, bạn đã sai lầm trong việc tính toán.)

* *

Thời gian dài nhất mà ta đã gặp trong thiên nhiên là thời gian sống của đồng vị phóng xạ nào đó, trên 10^{15} năm và giới hạn dưới của sự phân rã proton là trên 10^{32} năm. Những Xem 162 thời gian này lớn hơn tuổi của vũ trụ rất nhiều, mà người ta đã ước tính là 14 tỷ năm.

* *

Có một đơn vị chính thức dùng để đo độ cay của ớt được gọi là *pungency*. Tên gọi này bắt nguồn từ một hợp chất hữu cơ tên là *capsaicin*. Nếu bạn nhân nồng độ capsaicin cho 16 phần triệu bạn sẽ có *đơn vị cay Scoville* của ớt. Một vài loại ớt cực cay có độ cay hơn 2 triệu Scoville.

Độ chính xác và độ đúng của các phép đo

Đo lường là nền tảng của vật lý. Mỗi phép đo có một *sai số*. Sai số là do sự thiếu chính xác hay chưa đúng. *Độ chính xác* là mức độ tái lập kết quả khi phép đo được lặp lại; *độ đúng* là mức độ tương ứng của kết quả đo với giá trị thực.

Sự thiếu chính xác là do *các sai số ngẫu nhiên* hay tình cờ; sai số được đánh giá tốt nhất bằng *độ lệch tiêu chuẩn*, ký hiệu σ; được định nghĩa như sau

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 , \qquad (137)$$

trong đó $\bar{x}$ là giá trị trung bình của các kết quả đo x_i. (Bạn có biết tại sao người ta dùng Câu đố 170 s $n-1$ trong công thức thay vì n không?)

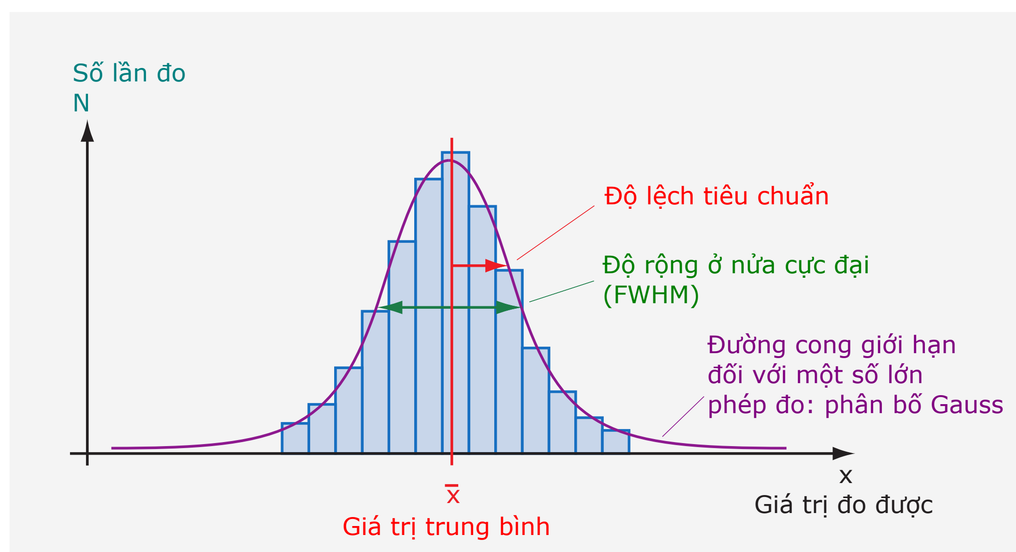
Đối với phần lớn các thí nghiệm, sự phân bố của các giá trị đo được đều hướng tới phân bố chuẩn, còn gọi là *phân bố Gauss*, khi số lượng phép đo tăng lên. Phân bố biểu diễn trong Hình 182, được mô tả bởi biểu thức

$$N(x) \approx \mathrm{e}^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} . \qquad (138)$$

Bình phương của độ lệch tiêu chuẩn σ^2 được gọi là *phương sai*. Đối với phân bố Gauss Câu đố 171 e của các giá trị đo được, 2.35σ là độ rộng tại nửa cực đại.

Độ đúng không cao là do *các sai số hệ thống*;thường người ta chỉ có thể ước lượng các sai số này. Phần ước lượng này được thêm vào sai số ngẫu nhiên để tạo ra *sai số toàn* Xem 165 *phần của thí nghiệm*, đôi khi còn được gọi là *độ bất định toàn phần*. Sai số *tương đối* hay độ bất định là tỷ số giữa sai số và giá trị đo được.

Thí dụ một phép đo chuyên nghiệp sẽ cho một kết quả như 0.312(6) m. Con số giữa hai dấu ngoặc đơn là độ lệch tiêu chuẩn σ, theo đơn vị của chữ số cuối cùng. Theo trên, ta đã giả sử kết quả đo tuân theo phân bố Gauss. Do đó, một giá trị 0.312(6) m hàm ý Câu đố 172 e rằng giá trị thực theo mong đợi nằm



HÌNH 182 Một thí nghiệm chính xác và phân bố của các giá trị đo được. Sự chính xác cao nếu bề rộng của phân bố hẹp; độ đúng cao nếu tâm của phân bố phù hợp với giá trị thực.

— trong khoảng 1σ với xác suất 68.3 %, như vậy trong thí dụ này nằm trong khoảng 0.312 ± 0.006 m;
— trong khoảng 2σ với xác suất 95.4 %, như vậy trong thí dụ này nằm trong khoảng 0.312 ± 0.012 m;
— trong khoảng 3σ với xác suất 99.73 %, như vậy trong thí dụ này nằm trong khoảng 0.312 ± 0.018 m;
— trong khoảng 4σ với xác suất 99.9937 %, như vậy trong thí dụ này nằm trong khoảng 0.312 ± 0.024 m;
— trong khoảng 5σ với xác suất 99.999 943 %, như vậy trong thí dụ này nằm trong khoảng 0.312 ± 0.030 m;
— trong khoảng 6σ với xác suất 99.999 999 80 %, như vậy trong thí dụ này nằm trong khoảng 0.312 ± 0.036 m;
— trong khoảng 7σ với xác suất 99.999 999 999 74 %, như vậy trong thí dụ này nằm trong khoảng 0.312 ± 0.041 m.

(Những con số sau có ý nghĩa không?)

Nên nhớ rằng độ lệch tiêu chuẩn có 1 chữ số; bạn phải là một chuyên gia tầm cỡ thế giới mới dùng 2 chữ số, và một anh hề mới dùng nhiều chữ số hơn. Nếu không cho độ lệch tiêu chuẩn, thì xem như bằng (1). Kết quả, đối với các tay chuyên nghiệp, thì 1 km và 1000 m *không* giống nhau!

Điều gì sẽ xảy ra cho các sai số khi hai giá trị đo được A và B được cộng hay trừ với nhau? Nếu tất cả các phép đo độc lập – hay không tương quan – độ lệch tiêu chuẩn của tổng *và* hiệu sẽ là $\sigma = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}$. Đối với tích hay thương của hai giá trị đo được không tương quan C và D, kết quả là $\rho = \sqrt{\rho_C^2 + \rho_D^2}$, ở đây ρ là độ lệch tiêu chuẩn *tương đối*.

Câu đố 173 s Giả sử bạn đo được một vật đi được 1.0 m trong 3.0 s: giá trị đo được của tốc độ là bao nhiêu?

Giới hạn của độ chính xác

Giới hạn của độ đúng và độ chính xác là gì? Không có cách nào, ngay cả theo nguyên tắc, để đo một chiều dài x với *độ chính xác* cao hơn 61 chữ số, vì trong thiên nhiên, tỷ số giữa chiều dài lớn nhất và nhỏ nhất có thể đo được là $\Delta x/x > l_{Pl}/d_{horizon} = 10^{-61}$. (Tỷ số
Câu đố 174 e
này còn đúng với lực và thể tích không?) Trong quyển sách sau cùng của chúng ta, việc nghiên cứu đồng hồ và thước sẽ củng cố cho giới hạn lý thuyết này.

Quyển VI, trang 94
Cũng dễ suy ra các giới hạn thực tế chặt chẽ hơn. Không có máy móc tưởng tượng nào có thể đo các đại lượng với độ chính xác cao hơn phép đo đường kính của Trái đất trong phạm vi chiều dài nhỏ nhất đã đo được, khoảng 10^{-19} m; giới hạn đó có khoảng 26 chữ số chính xác. Dùng một giới hạn hiện thực hơn của một máy có kích cỡ 1000 m sẽ dẫn tới một giới hạn 22 chữ số. Nếu, như đã tiên đoán ở trên, các phép đo thời gian thực sự đạt tới 17 chữ số chính xác, thì chúng đang tiến gần đến giới hạn thực tế, vì tách rời khỏi kích thước, có một ràng buộc thực tế phụ: chi phí. Thật vậy, thêm một chữ số chính xác trong phép đo thường có nghĩa là thêm một chữ số vào chi phí thiết bị.

Các hằng số vật lý

Trong vật lý, các quan trắc tổng quát được suy ra từ các quan trắc cơ bản hơn. Kết quả là nhiều phép đo có thể được suy ra từ những phép đo cơ bản hơn. Các phép đo cơ bản nhất là các phép đo các hằng số vật lý.

Các bảng sau đây cho các giá trị tốt nhất thế giới của các hằng số vật lý và các tính chất quan trọng nhất – theo đơn vị SI và vài đơn vị quen thuộc khác – như đã công bố
Xem 166
trong phần tham khảo các tiêu chuẩn. Các giá trị là trung bình của các phép đo tốt nhất thế giới đã được thực hiện cho đến nay. Như thường lệ, sai số thực nghiệm, bao gồm cả sai số ngẫu nhiên và sai số hệ thống đã được ước lượng, biểu diễn theo dạng độ lệch tiêu chuẩn được cho vào chữ số cuối cùng. Đúng ra thì sau mỗi số trong các bảng sau đây là
Xem 167
một câu chuyện dài đáng kể lại, nhưng ở đây không đủ chỗ để làm việc đó.

Về nguyên tắc, *mọi* tính chất định lượng của vật chất đều có thể tính toán bằng Thuyết
Trang 261
lượng tử – nói chính xác hơn là các phương trình của mô hình chuẩn của hạt – và tập hợp các hằng số *cơ bản* được cho trong bảng sau đây. Thí dụ như màu sắc, mật độ và các tính chất đàn hồi đều có thể tiên đoán được bằng phương thức này.

BẢNG 30 Các hằng số vật lý cơ bản.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị theo đơn vị SI	Độ bđ.[a]
Các hằng số dùng để định nghĩa các đơn vị đo lường SI			
Tốc độ của ánh sáng trong chân không [c]	c	299 792 458 m/s	0
Hằng số Planck [c]	h	$6.626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ Js	0
Hằng số Planck rút gọn, lượng tử tác dụng	$\hbar$	$1.054\,571\,817 ... \cdot 10^{-34}$ Js	0
Điện tích Positron [c]	e	0.160 217 6634 aC	0
Hằng số Boltzmann [c]	k	$1.380\,649 \cdot 10^{-23}$ J/K	0
Số Avogadro	N_A	$6.022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ 1/mol	0
Hằng số *sẽ* dùng để định nghĩa đơn vị đo lường SI			

BẢNG 30 (Tiếp theo) Các hằng số vật lý cơ bản.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị theo đơn vị SI	Độ bđ[a]
Hằng số hấp dẫn	G	$6.674\,30(15) \cdot 10^{-11}\ \mathrm{Nm^2/kg^2}$	$2.2 \cdot 10^{-5}$
Các hằng số cơ bản khác			
Số chiều không-thời gian		$3+1$	0 [b]
Hằng số cấu trúc tinh tế [d] hay	$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c}$	$1/137.035\,999\,084(21)$	$1.5 \cdot 10^{-10}$
hằng số liên kết điện từ	$= g_{em}(m_e^2c^2)$	$= 0.007\,297\,352\,5693(11)$	$1.5 \cdot 10^{-10}$
Hằng số liên kết Fermi [d] hay	$G_F/(\hbar c)^3$	$1.166\,3787(6) \cdot 10^{-5}\ \mathrm{GeV^{-2}}$	$5.1 \cdot 10^{-7}$
hằng số liên kết yếu	$\alpha_w(M_Z) = g_w^2/(4\pi)$	$1/30.1(3)$	$1 \cdot 10^{-2}$
Hằng số liên kết mạnh [d]	$\alpha_s(M_Z) = g_s^2/(4\pi)$	$0.1179(10)$	$8.5 \cdot 10^{-3}$
Góc hoà trộn yếu	$\sin^2\theta_W(\overline{MS})$	$0.231\,22(4)$	$1.7 \cdot 10^{-4}$
	$\sin^2\theta_W$ (trên mặt) $= 1-(m_W/m_Z)^2$	$0.222\,90(30)$	$1.3 \cdot 10^{-3}$
Matrix hoà trộn quark CMK	$\|V\|$	$\begin{pmatrix} 0.97383(24) & 0.2272(10) & 0.00396(9) \\ 0.2271(10) & 0.97296(24) & 0.04221(80) \\ 0.00814(64) & 0.04161(78) & 0.999100(34) \end{pmatrix}$	
Bất biến Jarlskog	J	$3.08(18) \cdot 10^{-5}$	
Matrix hoà trộn neutrino PMNS	$\|P\|$	$\begin{pmatrix} 0.82(2) & 0.55(4) & 0.150(7) \\ 0.37(13) & 0.57(11) & 0.71(7) \\ 0.41(13) & 0.59(10) & 0.69(7) \end{pmatrix}$	
Khối lượng Electron	m_e	$9.109\,383\,7015(28) \cdot 10^{-31}\ \mathrm{kg}$	$3.0 \cdot 10^{-10}$
		$5.485\,799\,090\,65(16) \cdot 10^{-4}\ \mathrm{u}$	$2.9 \cdot 10^{-11}$
		$0.510\,998\,950\,00(15)\ \mathrm{MeV}$	$3.0 \cdot 10^{-10}$
Khối lượng Muon	m_μ	$1.883\,531\,627(42) \cdot 10^{-28}\ \mathrm{kg}$	$2.2 \cdot 10^{-8}$
		$105.658\,3755(23)\ \mathrm{MeV}$	$2.2 \cdot 10^{-8}$
Khối lượng Tau	m_τ	$1.776\,82(12)\ \mathrm{GeV}/c^2$	$6.8 \cdot 10^{-5}$
Khối lượng neutrino electron	m_{ν_e}	$< 2\ \mathrm{eV}/c^2$	
Khối lượng neutrino Muon	m_{ν_μ}	$< 2\ \mathrm{eV}/c^2$	
Khối lượng neutrino Tau	m_{ν_τ}	$< 2\ \mathrm{eV}/c^2$	
Khối lượng quark Up	u	$21.6(+0.49/-0.26)\ \mathrm{MeV}/c^2$	
Khối lượng quark Down	d	$4.67(+0.48/-0.17)\ \mathrm{MeV}/c^2$	
Khối lượng quark Strange	s	$93(+11/-5)\ \mathrm{MeV}/c^2$	
Khối lượng quark Charm	c	$1.27(2)\ \mathrm{GeV}/c^2$	
Khối lượng quark Bottom	b	$4.18(3)\ \mathrm{GeV}/c^2$	
Khối lượng quark Top	t	$172.9(0.4)\ \mathrm{GeV}/c^2$	
Khối lượng Photon	γ	$< 2 \cdot 10^{-54}\ \mathrm{kg}$	
Khối lượng boson W	$W^\pm$	$80.379(12)\ \mathrm{GeV}/c^2$	
Khối lượng boson Z	Z^0	$91.1876(21)\ \mathrm{GeV}/c^2$	
Khối lượng Higgs	H	$125.10(14)\ \mathrm{GeV}/c^2$	
Khối lượng Gluon	$g_{1...8}$	$c.\ 0\ \mathrm{MeV}/c^2$	

a. Độ bất định: độ lệch tiêu chuẩn của sai số của phép đo.
b. Chỉ đo được từ 10^{-19} m tới 10^{26} m.
c. Hằng số định nghĩa.
d. Tất cả các hằng số liên kết phụ thuộc vào sự chuyển động lượng 4 chiều, như đã giải thích trong phần tái chuẩn hoá. *Hằng số cấu trúc tinh tế* là tên truyền thống của hằng số liên kết điện từ g_{em} trong trường hợp chuyển động lượng 4 chiều có $Q^2 = m_e^2 c^2$, là giá trị khả hữu nhỏ nhất. Ở mức chuyển động lượng cao hơn, nó có giá trị lớn hơn, tức là $g_{em}(Q^2 = M_W^2 c^2) \approx 1/128$. Trái lại, hằng số liên kết mạnh ở mức chuyển động lượng cao hơn, có giá trị nhỏ hơn; tức là $\alpha_s(34\,\text{GeV}) = 0.14(2)$.

Page 131

Tại sao các hằng số cơ bản này lại có giá trị như vậy? Đối với một hằng số bất kỳ *có thứ nguyên*, như lượng tử tác dụng $\hbar$, trị số chỉ có giá trị lịch sử. Nó là $1.054 \cdot 10^{-34}$ Js vì định nghĩa SI của joule và giây. Do đó câu hỏi tại sao giá trị của một hằng số *có thứ nguyên* không lớn hơn hay nhỏ hơn, luôn luôn đòi hỏi ta hiểu nguồn gốc của các số *không thứ nguyên* là tỷ số giữa hằng số đó và *đơn vị tự nhiên* tương ứng được định nghĩa bằng c, G, k, N_A và $\hbar$. Thông tin và giá trị của các đơn vị tự nhiên được cho trong một phần riêng.

Quyển IV, trang 209

Việc tìm hiểu kích thước nguyên tử, con người, cây cối và ngôi sao, thời gian xảy ra của các quá trình phân tử và nguyên tử, khối lượng của hạt nhân và núi non, bao hàm việc tìm hiểu về các tỷ số giữa các giá trị này và đơn vị tự nhiên tương ứng. Như vậy điểm chính yếu của việc tìm hiểu thiên nhiên là tìm hiểu tất cả các tỷ số của phép đo, tức là tất cả các hằng số không thứ nguyên. Nhiệm vụ tìm hiểu tất cả các tỷ số, bao gồm chính hằng số cấu trúc tinh tế α, chỉ được hoàn tất trong quyển cuối cùng của cuộc phiêu lưu.

Các hằng số cơ bản sinh ra các kết quả quan sát hữu ích, có độ chính xác cao, sau đây:

BẢNG 31 Các hằng số vật lý dẫn xuất.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị theo đơn vị SI	Độ bđ.
Độ từ thẩm của chân không	μ_0	1.256 637 062 12(19) μH/m	$1.5 \cdot 10^{-10}$
Độ điện thẩm của chân không	$\varepsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$	8.854 187 8128(13) pF/m	$1.5 \cdot 10^{-10}$
Ba trở trong chân không	$Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$	376.730 313 668(57) Ω	$1.5 \cdot 10^{-10}$
Số Loschmidt ở 273.15 K và 101 325 Pa	N_L	$2.686\,780\,111... \cdot 10^{25}$ 1/m^3	0
Hằng số Faraday	$F = N_A e$	96 485.332 12... C/mol	0
Hằng số khí phổ dụng	$R = N_A k$	8.314 462 618... J/(mol K)	0
Thể tích mol của khí lý tưởng ở 273.15 K và 101 325 Pa	$V = RT/p$	22.413 969 54... l/mol	0
Hằng số Rydberg [a]	$R_\infty = m_e c\alpha^2/(2h)$	10 973 731.568 160(21) m^{-1}	$1.9 \cdot 10^{-12}$
Lượng tử độ dẫn	$G_0 = 2e^2/h$	77.480 917 29... μS	0
Lượng tử từ thông	$\varphi_0 = h/(2e)$	2.067 833 848... fWb	0
Tỷ số tần số Josephson	$2e/h$	483.597 8484... THz/V	0
Hằng số Von Klitzing	$h/e^2 = \mu_0 c/(2\alpha)$	25 812.807 45... Ω	0
Magneton Bohr	$\mu_B = e\hbar/(2m_e)$	9.274 010 0783(28) yJ/T	$3.0 \cdot 10^{-10}$
Bán kính electron cổ điển	$r_e = e^2/(4\pi\varepsilon_0 m_e c^2)$	2.817 940 3262(13) fm	$4.5 \cdot 10^{-10}$
Bước sóng Compton	$\lambda_C = h/(m_e c)$	2.426 310 238 67(73) pm	$3.0 \cdot 10^{-10}$
của electron	$\lambda\!\!\!^-_c = \hbar/(m_e c) = r_e/\alpha$	0.386 159 267 96(12) pm	$3.0 \cdot 10^{-10}$

BẢNG 31 (Tiếp theo) Các hằng số vật lý dẫn xuất.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị theo đơn vị SI	Độ bđ.
Bán kính Bohr [a]	$a_\infty = r_e/\alpha^2$	52.917 721 0903(80) pm	$1.5 \cdot 10^{-10}$
Lượng tử của lưu số	$h/(2m_e)$	3.636 947 5516(11) cm^2/s	$3.0 \cdot 10^{-10}$
Điện tích riêng của positron	e/m_e	175.882 001 076(55) GC/kg	$3.0 \cdot 10^{-10}$
Tần số Cyclotron của electron	$f_c/B = e/(2\pi m_e)$	27.992 489 872(9) GHz/T	$3.0 \cdot 10^{-10}$
Moment từ của electron	μ_e	−9.284 764 7043(28) yJ/T	$3.0 \cdot 10^{-10}$
	μ_e/μ_B	−1.001 159 652 181 28(18)	$1.7 \cdot 10^{-13}$
	μ_e/μ_N	$-1\,838.281\,971\,88(11) \cdot 10^3$	$6.0 \cdot 10^{-11}$
Thừa số g của electron	g_e	−2.002 319 304 362 56(35)	$1.7 \cdot 10^{-13}$
Tỷ khối muon–electron	m_μ/m_e	206.768 2830(46)	$2.2 \cdot 10^{-8}$
Moment từ của muon	μ_μ	$-4.490\,448\,30(10) \cdot 10^{-26}$ J/T	$2.2 \cdot 10^{-8}$
Thừa số g của muon	g_μ	−2.002 331 8418(13)	$6.3 \cdot 10^{-10}$
Đơn vị khối lượng nguyên tử	$1\ u = m_{^{12}C}/12$	$1.660\,539\,066\,60(50) \cdot 10^{-27}$ kg	$3.0 \cdot 10^{-10}$
Khối lượng proton	m_p	$1.672\,621\,923\,69(51) \cdot 10^{-27}$ kg	$3.1 \cdot 10^{-10}$
		1.007 276 466 621(53) u	$5.3 \cdot 10^{-11}$
		938.272 088 16(29) MeV	$3.1 \cdot 10^{-10}$
Tỷ khối proton–electron	m_p/m_e	1 836.152 673 43(11)	$6.0 \cdot 10^{-11}$
Điện tích riêng của proton	e/m_p	$9.578\,833\,1560(29) \cdot 10^7$ C/kg	$3.1 \cdot 10^{-10}$
Bước sóng Compton của proton	$\lambda_{C,p} = h/(m_p c)$	1.321 409 855 39(40) fm	$3.1 \cdot 10^{-10}$
Magneton hạt nhân	$\mu_N = e\hbar/(2m_p)$	$5.050\,783\,7461(15) \cdot 10^{-27}$ J/T	$3.1 \cdot 10^{-10}$
Moment từ của proton	μ_p	$1.410\,606\,797\,36(60) \cdot 10^{-26}$ J/T	$4.2 \cdot 10^{-10}$
	μ_p/μ_B	$1.521\,032\,202\,30(46) \cdot 10^{-3}$	$3.0 \cdot 10^{-10}$
	μ_p/μ_N	2.792 847 344 63(82)	$2.9 \cdot 10^{-10}$
Tỷ số hồi chuyển từ của proton	$\gamma_p = 2\mu_p/h$	42.577 478 518(18) MHz/T	$4.2 \cdot 10^{-10}$
Thừa số g của proton	g_p	5.585 694 6893(16)	$2.9 \cdot 10^{-10}$
Khối lượng neutron	m_n	$1.674\,927\,498\,04(95) \cdot 10^{-27}$ kg	$5.7 \cdot 10^{-10}$
		1.008 664 915 95(43) u	$4.8 \cdot 10^{-10}$
		939.565 420 52(54) MeV	$5.7 \cdot 10^{-10}$
Tỷ khối neutron–electron	m_n/m_e	1 838.683 661 73(89)	$4.8 \cdot 10^{-10}$
Tỷ khối neutron–proton	m_n/m_p	1.001 378 419 31(49)	$4.9 \cdot 10^{-10}$
Bước sóng Compton của neutron	$\lambda_{C,n} = h/(m_n c)$	1.319 590 905 81(75) fm	$5.7 \cdot 10^{-10}$
Moment từ của neutron	μ_n	$-0.966\,236\,51(23) \cdot 10^{-26}$ J/T	$2.4 \cdot 10^{-7}$
	μ_n/μ_B	$-1.041\,875\,63(25) \cdot 10^{-3}$	$2.4 \cdot 10^{-7}$
	μ_n/μ_N	−1.913 042 73(45)	$2.4 \cdot 10^{-7}$
Hằng số Stefan–Boltzmann	$\sigma = \pi^2 k^4/(60\hbar^3 c^2)$	56.703 744 19... $nW/(m^2K^4)$	0
Hằng số dịch chuyển Wien	$b = \lambda_{max} T$	2.897 771 955... mmK	0
		58.789 257 57... GHz/K	0
Electron volt	eV	0.160 217 6634... aJ	0
Hệ số chuyển đổi bit sang entropy	$k \ln 2$	10^{23} bit = 0.956 994... J/K	0

BẢNG 31 (Tiếp theo) Các hằng số vật lý dẫn xuất.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị theo đơn vị SI	Độ bđ.
Năng lượng của TNT		3.7 tới 4.0 MJ/kg	$4 \cdot 10^{-2}$

a. Đối với khối lượng hạt nhân lớn vô hạn.

Một số tính chất hữu ích của môi trường địa phương của chúng ta được cho trong bảng sau đây.

BẢNG 32 Các hằng số thiên văn.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị
Năm tropic 1900 [a]	a	31 556 925.974 7 s
Năm tropic 1994	a	31 556 925.2 s
Ngày sao trung bình	d	$23^h 56' 4.090\,53''$
Khoảng cách Trái đất–Mặt trời trung bình [b]		149 597 870.691(30) km
Đơn vị thiên văn [b]	AU	149 597 870 691 m
Năm ánh sáng, căn cứ trên năm Julian [b]	al	9.460 730 472 5808 Pm
Parsec	pc	30.856 775 806 Pm = 3.261 634 al
Khối lượng Trái đất	$M_♁$	$5.973(1) \cdot 10^{24}$ kg
Hằng số hấp dẫn địa tâm	GM	$3.986\,004\,418(8) \cdot 10^{14}\ \mathrm{m^3/s^2}$
Chiều dài hấp dẫn của Trái đất	$l_♁ = 2GM/c^2$	8.870 056 078(16) mm
Bán kính xích đạo của Trái đất [c]	$R_{♁eq}$	6378.1366(1) km
Bán kính cực của Trái đất [c]	$R_{♁p}$	6356.752(1) km
Khoảng cách xích đạo–cực [c]		10 001.966 km (trung bình)
Độ phẳng của Trái đất [c]	$e_♁$	1/298.25642(1)
Mật độ trung bình của Trái đất	$\rho_♁$	$5.5\ \mathrm{Mg/m^3}$
Tuổi Trái đất	$T_♁$	4.50(4) Ga = 142(2) Ps
Gia tốc trọng lực	g	$9.806\,65\ \mathrm{m/s^2}$
Áp suất khí quyển chuẩn của Trái đất	p_0	101 325 Pa
Bán kính Mặt trăng	$R_{☾ v}$	1738 km theo hướng của Trái đất
Bán kính Mặt trăng	$R_{☾ h}$	1737.4 km theo hai hướng khác
Khối lượng Mặt trăng	$M_☾$	$7.35 \cdot 10^{22}$ kg
Khoảng cách trung bình tới Mặt trăng [d]	$d_☾$	384 401 km
Khoảng cách tới Mặt trăng ở điểm cận địa [d]		tiêu biểu 363 Mm, cực tiểu trong lịch sử 359 861 km
Khoảng cách tới Mặt trăng ở điểm viễn địa [d]		tiêu biểu 404 Mm, cực đại trong lịch sử 406 720 km
Kích thước góc của Mặt trăng [e]		trung bình 0.5181° = 31.08 ′, cực tiểu 0.49°, cực đại 0.55°
Mật độ trung bình của Mặt trăng	$\rho_☾$	$3.3\ \mathrm{Mg/m^3}$
Gia tốc hấp dẫn tại bề mặt Mặt trăng	$g_☾$	$1.62\ \mathrm{m/s^2}$
Áp suất khí quyển Mặt trăng	$p_☾$	từ 10^{-10} Pa (đêm) tới 10^{-7} Pa (ngày)

BẢNG 32 (Tiếp theo) Các hằng số thiên văn.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị
Khối lượng Mộc tinh	$M_{♃}$	$1.90 \cdot 10^{27}$ kg
Bán kính Mộc tinh, xích đạo	$R_{♃}$	71.398 Mm
Bán kính Mộc tinh, cực	$R_{♃}$	67.1(1) Mm
Khoảng cách trung bình Mộc tinh-Mặt trời	$D_{♃}$	778 412 020 km
Gia tốc hấp dẫn tại bề mặt Mộc tinh	$g_{♃}$	24.9 m/s^2
Áp suất khí quyển Mộc tinh	$p_{♃}$	từ 20 kPa tới 200 kPa
Khối lượng Mặt trời	$M_{\odot}$	$1.988\,43(3) \cdot 10^{30}$ kg
Chiều dài hấp dẫn của Mặt trời	$2GM_{\odot}/c^2$	2.953 250 08(5) km
Hằng số hấp dẫn nhật tâm	$GM_{\odot}$	$132.712\,440\,018(8) \cdot 10^{18}\ m^3/s^2$
Độ trưng của Mặt trời	$L_{\odot}$	384.6 YW
Bán kính xích đạo Mặt trời	$R_{\odot}$	695.98(7) Mm
Kích thước góc của Mặt trời		0.53° trung bình; cực tiểu vào ngày 4/7 (điểm viễn nhật) 1888″, cực đại vào ngày 4/1 (điểm cận nhật) 1952″
Mật độ trung bình của Mặt trời	$\rho_{\odot}$	1.4 Mg/m^3
Khoảng cách trung bình tới Mặt trời	AU	149 597 870.691(30) km
Tuổi Mặt trời	$T_{\odot}$	4.6 Ga
Vận tốc Mặt trời quanh tâm thiên hà	$v_{\odot g}$	220(20) km/s
Vận tốc Mặt trời đối với nền vũ trụ	$v_{\odot b}$	370.6(5) km/s
Gia tốc hấp dẫn tại bề mặt Mặt trời	$g_{\odot}$	274 m/s^2
Áp suất hạ quang quyển của Mặt trời	$p_{\odot}$	15 kPa
Khoảng cách tới tâm Ngân hà		8.0(5) kpc = 26.1(1.6) kal
Tuổi Ngân hà		13.6 Ga
Kích thước Ngân hà		*c.* 10^{21} m hay 100 kal
Khối lượng Ngân hà		10^{12} khối lượng Mặt trời, *c.* $2 \cdot 10^{42}$ kg
Đám thiên hà xa nhất đã biết	SXDF-XCLJ 0218-0510	$9.6 \cdot 10^9$ al

a. Định nghĩa một hằng lượng giữa 2 lần đi qua điểm xuân phân liên tiếp; đã có lần người ta dùng nó để định nghĩa giây. (Nên nhớ: π s thì bằng cỡ một nano-thế kỷ.) Giá trị 1990 thì ít hơn khoảng 0.7 s, tương ứng với việc đi chậm lại khoảng 0.2 ms/a. (Coi chừng: tại sao?) Có cả một công thức theo kinh nghiệm dành cho sự thay đổi chiều dài của năm theo thời gian.

Câu đố 175 s
Xem 288

b. Độ chính xác đáng kinh ngạc trong khoảng cách trung bình Trái đất–Mặt trời, vì chỉ có 30 m, là nhờ việc đo thời gian trung bình của các tín hiệu gởi từ phi thuyền Viking và phi thuyền thám hiểm Hoả tinh được thực hiện trong thời gian hơn 20 năm. Cũng nên nhớ rằng Hiệp hội thiên văn quốc tế phân biệt khoảng cách trung bình Trái đất–Mặt trời với *đơn vị thiên văn*; đại lượng sau được định nghĩa như một chiều dài cố định và chính xác. *Năm ánh sáng* cũng là một đơn vị được IAU định nghĩa là một con số chính xác. Để biết thêm chi tiết, hãy xem trang www.iau.org/public/measuring.

c. Hình dạng của Trái đất được Hệ thống trắc địa thế giới mô tả chính xác nhất. Ấn bản sau cùng đã có từ năm 1984. Để có một cái nhìn bao quát về nền tảng cũng như chi tiết, hãy xem website www.wgs84.com. Hiệp hội trắc địa quốc tế đã tinh lọc dữ liệu trong năm 2000. Bán kính và độ phẳng được ghi ra đây là dữ liệu dành cho 'hệ thuỷ triều trung bình'. Chúng khác với dữ liệu của 'hệ không thuỷ triều' và các hệ khác vào khoảng 0.7 m. Các thông tin cũng đã tự tạo thành một khoa học.
d. Được đo giữa 2 tâm. Để tìm vị trí chính xác của Mặt trăng vào ngày tháng đã cho, hãy xem trang www.fourmilab.ch/earthview/moon_ap_per.html. Đối với các hành tinh hãy xem trang www.fourmilab.ch/solar/solar.html và các trang khác trên cùng site.
e. Góc được định nghĩa như sau: 1 độ = $1^\circ = \pi/180$ rad, 1 phút (đầu tiên) = $1' = 1^\circ/60$, 1 giây (phút) = $1'' = 1'/60$. Các đơn vị cổ 'phút thứ 3' và 'phút thứ tư', mỗi đơn vị là 1/60 của đơn vị đứng trước, không còn được sử dụng nũa. ('Minute' có nghĩa là 'rất nhỏ' và nó vẫn còn giữ nghĩa đó trong Anh văn hiện đại.)

Câu đố 176 s Một số tính chất của thiên nhiên ở tầm cỡ lớn được liệt kê trong bảng dưới đây. (Thêm một câu đố, bạn có thể xác định xem một tính chất bất kỳ của vũ trụ đã được liệt kê hay chưa?)

BẢNG 33 Các hằng số vũ trụ.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị
Hằng số vũ trụ	Λ	$c.\ 1 \cdot 10^{-52}\ \mathrm{m}^{-2}$
Tuổi của vũ trụ [a]	t_0	$4.333(53) \cdot 10^{17}$ s = $13.8(0.1) \cdot 10^9$ a
(được xác định từ không-thời gian, thông qua sự giãn nở, và sử dụng Thuyết tương đối tổng quát)		
Tuổi của vũ trụ [a]	t_0	trên $3.5(4) \cdot 10^{17}$ s = $11.5(1.5) \cdot 10^9$ a
(được xác định từ vật chất, thông qua các thiên hà và ngôi sao, sử dụng Thuyết lượng tử)		
Tham số Hubble [a]	H_0	$2.3(2) \cdot 10^{-18}\ \mathrm{s}^{-1} = 0.73(4) \cdot 10^{-10}\ \mathrm{a}^{-1}$
	$= h_0 \cdot 100\ \mathrm{km/s\,Mpc} = h_0 \cdot 1.0227 \cdot 10^{-10}\ \mathrm{a}^{-1}$	
Tham số Hubble rút gọn [a]	h_0	0.71(4)
Tham số giảm tốc [a]	$q_0 = -(\ddot{a}/a)_0/H_0^2$	−0.66(10)
Khoảng cách chân trời vũ trụ [a]	$d_0 = 3ct_0$	$40.0(6) \cdot 10^{26}$ m = 13.0(2) Gpc
Topo của vũ trụ		độ không rời rạc lên tới 10^{26} m
Số chiều của không gian		3, cho các khoảng cách lên tới 10^{26} m
Mật độ tới hạn của vũ trụ	$\rho_c = 3H_0^2/(8\pi G)$	$h_0^2 \cdot 1.878\,82(24) \cdot 10^{-26}\ \mathrm{kg/m^3}$ $= 0.95(12) \cdot 10^{-26}\ \mathrm{kg/m^3}$
Tham số mật độ (toàn phần) [a]	$\Omega_0 = \rho_0/\rho_c$	1.02(2)
Tham số mật độ Baryon [a]	$\Omega_{B0} = \rho_{B0}/\rho_c$	0.044(4)
Tham số mật độ vật chất tối lạnh [a]	$\Omega_{CDM0} = \rho_{CDM0}/\rho_c$	0.23(4)
Tham số mật độ Neutrino [a]	$\Omega_{\nu 0} = \rho_{\nu 0}/\rho_c$	0.001 to 0.05
Tham số mật độ năng lượng tối [a]	$\Omega_{X0} = \rho_{X0}/\rho_c$	0.73(4)
Tham số trạng thái năng lượng tối	$w = p_X/\rho_X$	−1.0(2)
Khối lượng Baryon	m_b	$1.67 \cdot 10^{-27}$ kg
Mật độ số Baryon		$0.25(1)\ /\mathrm{m}^3$
Mật độ vật chất sáng		$3.8(2) \cdot 10^{-28}\ \mathrm{kg/m^3}$
Số ngôi sao trong vũ trụ	n_s	$10^{22\pm1}$

BẢNG 33 (Tiếp theo) Các hằng số vũ trụ.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị
Số Baryon trong vũ trụ	n_b	$10^{81\pm1}$
Nhiệt độ nền vi ba[b]	T_0	2.725(1) K
Số Photon trong vũ trụ	n_γ	10^{89}
Mật độ năng lượng Photon	$\rho_\gamma = \pi^2 k^4/(15T_0^4)$	$4.6 \cdot 10^{-31}$ kg/m^3
Mật độ số Photon		410.89 /cm^3 hay 400 /cm$^3(T_0/2.7\,\text{K})^3$
Biên độ nhiễu loạn mật độ	$\sqrt{S}$	$5.6(1.5) \cdot 10^{-6}$
Biên độ sóng hấp dẫn	$\sqrt{T}$	$< 0.71\sqrt{S}$
Thăng giáng khối lượng cho 8 Mpc	σ_8	0.84(4)
Chỉ số vô hướng	n	0.93(3)
Độ biến thiên của chỉ số vô hướng	$\mathrm{d}n/\mathrm{d}\ln k$	−0.03(2)
Chiều dài Planck	$l_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^3}$	$1.62 \cdot 10^{-35}$ m
Thời gian Planck	$t_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^5}$	$5.39 \cdot 10^{-44}$ s
Khối lượng Planck	$m_{Pl} = \sqrt{\hbar c/G}$	21.8 µg
Số khoảnh khắc trong lịch sử[a]	t_0/t_{Pl}	$8.7(2.8) \cdot 10^{60}$
Số điểm không-thời gian trong chân trời[a]	$N_0 = (R_0/l_{Pl})^3 \cdot (t_0/t_{Pl})$	$10^{244\pm1}$
Khối lượng trong chân trời	M	$10^{54\pm1}$ kg

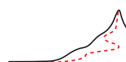
a. Chỉ số 0 chỉ giá trị hiện tại.
b. Bức xạ phát sinh khi vũ trụ được 380 000 tuổi và có nhiệt độ khoảng 3000 K; độ thăng giáng ΔT_0 dẫn tới việc hình thành thiên hà ngày nay khoảng $16 \pm 4\,\mu\text{K} = 6(2) \cdot 10^{-6}\,T_0$.

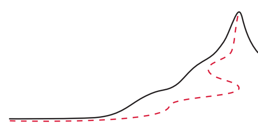
Quyển II, trang 235

Các số hữu ích

π	$3.14159\,26535\,89793\,23846\,26433\,83279\,50288\,41971\,69399\,37510_5$
e	$2.71828\,18284\,59045\,23536\,02874\,71352\,66249\,77572\,47093\,69995_9$
γ	$0.57721\,56649\,01532\,86060\,65120\,90082\,40243\,10421\,59335\,93992_3$
ln 2	$0.69314\,71805\,59945\,30941\,72321\,21458\,17656\,80755\,00134\,36025_5$
ln 10	$2.30258\,50929\,94045\,68401\,79914\,54684\,36420\,76011\,01488\,62877_2$
$\sqrt{10}$	$3.16227\,76601\,68379\,33199\,88935\,44432\,71853\,37195\,55139\,32521_6$

Xem 289





Phụ lục 14

Tính chất của hạt phức hợp

Trang 261
Câu đố 177 s

Bảng sau đây liệt kê các hạt phức hợp quan trọng nhất. Danh sách này không thay đổi nhiều, chủ yếu là vì sự phát triển đã xảy ra vào khoảng giữa thế kỷ 20. Về nguyên tắc, khi sử dụngmô hình chuẩn của Vật lý hạt, ta có thể suy ra được *mọi* tính chất của chất phức hợp và bức xạ. Đặc biệt là mọi tính chất của vật thể mà ta gặp trong đời sống hằng ngày. (Bạn có thể giải thích kích thước của một trái táo tuân theo mô hình chuẩn như thế nào không?) Các thí dụ về các chất phức hợp quan trọng nhất được nhóm lại trong bảng sau đây.

BẢNG 34 Tính chất của một số chất phức hợp.

Chất phức hợp	Khối lượng m, lượng tử số[a]	Thời gian sống τ, kiểu phân rã chính	Kích thước (đg. kính)
Meson (hadron, boson) (được chọn từ trên 130 loại đã biết)			
Pion $\pi^0(u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$	134.976 4(6) MeV/c^2	84(6) as, 2γ 98.798(32) %	~ 1 fm
	$I^G(J^{PC}) = 1^-(0^{-+})$, $S = C = B = 0$		
Pion $\pi^+(u\bar{d})$	139.569 95(35) MeV/c^2	26.030(5) ns,	~ 1 fm
		$\mu^+\nu_\mu$ 99.987 7(4) %	
	$I^G(J^P) = 1^-(0^-)$, $S = C = B = 0$		
Kaon K^0_S	$m_{K^0_S}$	89.27(9) ps	~ 1 fm
Kaon K^0_L	$m_{K^0_S}$ + 3.491(9) μeV/c^2	51.7(4) ns	~ 1 fm
Kaon $K^\pm$ $(u\bar{s}, \bar{u}s)$	493.677(16) MeV/c^2	12.386(24) ns,	~ 1 fm
		$\mu^+\nu_\mu$ 63.51(18) %	
		$\pi^+\pi^0$ 21.16(14) %	
Kaon K^0 (d$\bar{s}$) (50 % K_S, 50 % K_L)	497.672(31) MeV/c^2	không có	~ 1 fm
Tất cả kaon $K^\pm, K^0, K^0_S, K^0_L$:	$I(J^P) = \frac{1}{2}(0^-)$, $S = \pm 1$, $B = C = 0$		
Baryon (hadron, fermion) (được chọn từ trên 100 loại đã biết)			
Proton p hay N^+ (uud)	1.672 621 58(13) yg	$\tau_{\text{total}} > 1.6 \cdot 10^{25}$ a,	0.89(1) fm
	= 1.007 276 466 88(13) u	$\tau(p \to e^+\pi^0) > 5.5 \cdot 10^{32}$ a	Xem 290
	= 938.271 998(38) MeV/c^2		
	$I(J^P) = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}^+)$, $S = 0$		
	tỷ số hồi chuyển từ μ_p/μ_N = 2.792 847 337(29)		
	moment lưỡng cực điện $d = (-4 \pm 6) \cdot 10^{-26} e$ m		

BẢNG 34 (Tiếp theo) Tính chất của một số chất phức hợp.

Chất phức hợp	Khối lượng m, lượng tử số[a]	Thời gian sống τ, kiểu phân rã chính	Kích thước (đg. kính)
	độ phân cực điện $\alpha_e = 12.1(0.9) \cdot 10^{-4}\,\mathrm{fm}^3$		
	độ phân cực từ $\alpha_m = 2.1(0.9) \cdot 10^{-4}\,\mathrm{fm}^3$		
Neutron[b] n hay N^0 (udd)	1.674 927 16(13) yg	887.0(2.0) s, $pe^-\bar{\nu}_e$ 100 %	~ 1 fm
	= 1.008 664 915 78(55) u = 939.565 330(38) MeV/c^2		
	$I(J^P) = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}^+)$, $S = 0$		
	tỷ số hồi chuyển từ $\mu_n/\mu_N = -1.913\,042\,72(45)$		
	moment lưỡng cực điện $d_n = (-3.3 \pm 4.3) \cdot 10^{-28} e\,\mathrm{m}$		
	độ phân cực điện $\alpha = 0.98(23) \cdot 10^{-3}\,\mathrm{fm}^3$		
Omega Ω^- (sss)	1672.43(32) MeV/c^2	82.2(1.2) ps, ΛK^- 67.8(7) %, $\Xi^0\pi^-$ 23.6(7) %	~ 1 fm
	tỷ số hồi chuyển từ $\mu_\Omega/\mu_N = -1.94(22)$		
bức xạ phức hợp: glueball			
ứng viên glueball $f_0(1500)$, trạng thái không rõ	1503(11) MeV	độ rộng toàn phần 120(19) MeV	~ 1 fm
	$I^G(J^{PC}) = 0^+(0^{++})$		
Nguyên tử (được chọn từ 118 nguyên tố đã biết với trên 2000 nuclide đã biết) Xem 291			
Hydrogen (^{1}H) [nhẹ nhất]	1.007 825 032(1) u = 1.6735 yg		2 · 53 pm
Antihydrogen[c]	1.007 u = 1.67 yg		2 · 53 pm
Helium (^{4}He) [nhỏ nhất]	4.002 603250(1) u = 6.6465 yg		2 · 31 pm
Carbon (^{12}C)	12 u = 19.926 482(12) yg		2 · 77 pm
Bismuth (^{209}Bi*) [thời gian sống ngắn nhất và hiếm nhất]	209 u	0.1 ps Xem 292	
Tantalum (^{180m}Ta) [chất phóng xạ có thời gian sống dài thứ nhì]	180 u	> 10^{15} a Xem 293	
Bismuth (^{209}Bi) [chất phóng xạ có thời gian sống dài nhất]	209 u	1.9(2)10^{19} a Xem 292	
Francium (^{223}Fr) [lớn nhất]	223 u	22 min	2 · 0.28 nm
Oganesson (^{289}Og) [nặng nhất]	294 u	0.9 ms	
Phân tử[d] (được chọn từ trên 10^7 loại đã biết)			
Hydrogen (H_2)	~ 2 u	> 10^{25} a	
Nước (H_2O)	~ 18 u	> 10^{25} a	
ATP (adenosinetriphosphate)	507 u	> 10^{10} a	*c.* 3 nm

BẢNG 34 (Tiếp theo) Tính chất của một số chất phức hợp.

Chất phức hợp	Khối lượng m, lượng tử số[a]	Thời gian sống τ, kiểu phân rã chính	Kích thước (đg. kính)
Nhiễm sắc thể Y của người	$70 \cdot 10^6$ cặp base	$> 10^6$ a	*c.* 50 mm (không cuộn)
Các chất phức hợp khác			
Tế bào thần kinh của cá voi xanh	~ 1 kg	~ 50 a	20 m
Hồng huyết cầu	0.1 ng	7 cộng 120 ngày	~ 10 μm
Tinh trùng	10 pg	chưa thụ tinh: ~ 5 d	chiều dài 60 μm, đầu 3 μm × 5 μm
Trứng	1 μg	đã thụ tinh: trên 4 tỷ năm	~ 120 μm
Tế bào (*E. coli*)	1 pg	4 tỷ năm	thân: 2 μm
Táo	0.1 kg	4 tuần	0.1 m
Người trưởng thành	35 kg < m < 350 kg	$\tau \approx 2.5 \cdot 10^9$ s	
Xem 294	~ 1.7 m		
		≈ 600 triệu hơi thở	
		≈ 2.5 tỷ nhịp tim	
		< 122 a,	
		60 % H_2O và 40 % bụi	
Sinh vật nặng nhất: quần tộc cây dương	$6.6 \cdot 10^6$ kg	> 130 a	> 4 km
Chất phức hợp lớn hơn	Xem bảng trên Trang 260 trong quyển I.		

Trang 263 Ghi chú (cũng nên xem ghi chú của Bảng 9):

a. Số chẵn lẻ điện tích C chỉ được xác định đối với các hạt trung hoà nào đó, cụ thể là các hạt khác với phản hạt của chúng. Đối với meson trung hoà, số chẵn lẻ điện tích là $C = (-1)^{L+S}$, trong đó L là moment động lượng vân đạo.

P là số chẵn lẻ qua phép nghịch đảo không gian $\boldsymbol{r} \rightarrow -\boldsymbol{r}$. Đối với meson, nó liên hệ với moment động lượng vân đạo L qua hệ thức $P = (-1)^{L+1}$.

Độ phân cực điện, định nghĩa ở Trang 68 trong quyển III, được tiên đoán là sẽ triệt tiêu đối với mọi hạt sơ cấp.

Số chẵn lẻ G chỉ được định nghĩa đối với meson và bằng $G = (-1)^{L+S+I} = (-1)^I C$.

b. Neutron liên kết trong hạt nhân có thời gian sống ít nhất là 10^{20} năm.

c. *Phản nguyên tử* đầu tiên, được tạo thành từ antielectron và antiproton, tháng 1/1996 tại CERN

Xem 296 ở Geneva. Mọi tính chất của phản vật chất được kiểm tra từ trước đến nay đều nhất quán với các tiên đoán lý thuyết.

d. Số phân tử hiện hữu thì lớn hơn số phân tử đã được phân tích và đặt tên rất nhiều.

Chất phức hợp quan trọng nhất là *nguyên tử*. Kích thước, cấu trúc và tương tác của

chúng xác định tính chất và màu sắc của mọi vật. Các loại nguyên tử, còn được gọi là các *nguyên tố* trong Hoá học, thường được sắp xếp vào trong một *bảng tuần hoàn*, gồm các nhóm nguyên tử có cùng tính chất, thành các hàng và cột. Nó được trình bày trong Bảng 35 và proton, neutron, electron có thể kết nối với nhau để tạo thành các kết tập theo những cách khác nhau.

BẢNG 35 Bảng tuần hoàn của các nguyên tố, kèm theo nguyên tử số của chúng. xanh dương nhạt: phi kim loại, cam: kim loại kiềm, lục: kim loại kiềm thổ, xám: kim loại chuyển tiếp, xanh dương đậm: kim loại cơ bản, cam nhạt: á kim, vàng: halogen, nâu: khí hiếm, đỏ: lanthanoid, đỏ đậm: actinoid, đen: không có dữ liệu.

Nhóm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	I	II	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa		VIIIa		Ia	IIa	III	IV	V	VI	VII	VIII
Chu kỳ																		
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
Lanthanoid			*	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
Actinoid			**	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Tương tự Bảng tuần hoàn các nguyên tử, cũng có các bảng dành cho meson (do 2 quark tạo thành) và baryon (do 3 quark tạo thành). Cả 2 bảng meson và baryon đều không có ở đây; ta có thể tìm thấy chúng trong *Review of Particle Physics* ở trang pdg.web.cern.ch. Đúng ra bảng baryon vẫn còn nhiều chỗ trống. Các baryon còn thiếu thì

cực nặng và có đời sống cực ngắn (đồng nghĩa với việc tạo và phát hiện chúng khá tốn kém). Việc khám phá ra chúng để ta có thêm sự hiểu biết sâu sắc và mới mẻ không hề được mong đợi.

Ta có thể tìm thấy các Bảng tuần hoàn phức tạp hơn trên trang chemlab.pc.maricopa.edu/periodic. Bảng đẹp nhất có thể tìm thấy trên Trang 60. *Nguyên tử số* cho ta số proton (và electron) tìm thấy trong một nguyên tử của nguyên tố đã cho. Con số này xác định hoá tính của nguyên tố. Phần lớn – nhưng không phải là tất cả – các nguyên tố lên tới 92 được tìm thấy trên Trái đất; các nguyên tố khác có thể được tạo ra trong phòng thí nghiệm. Nguyên tố cao nhất đã được khám phá là nguyên tố 118. Có một trường hợp gian lận trong nghiên cứu nổi tiếng, một người nghiên cứu trong thập niên 1990 đã đánh lừa cả 2 nhóm nghiên cứu khi tuyên bố là đã tạo ra và quan sát được 2 nguyên tố 116 và 118. Sau này cả 2 nguyên tố đều đã được tạo ra và khảo sát một cách độc lập.

Xem 297 Hiện nay, người ta đã thu thập được một kho dữ liệu vật lý và hoá học khổng lồ của Trang 61 mọi nguyên tố. Hình ảnh của các nguyên tố thuần tuý được trình bày trong Hình 19. Các nguyên tố trong cùng một *nhóm* hành xử giống nhau trong các phản ứng hoá học. *Chu kỳ* xác định sự lặp lại các điểm tương đồng này.

Các nguyên tố của nhóm 1 là *kim loại kiềm* (mặc dù có hydrogen là một chất khí), các nguyên tố của nhóm 2 là kim loại kiềm thổ. *Actinoid*, *lanthanoid* cũng là kim loại, vì là các nguyên tố của các nhóm từ 3 tới 12, còn được gọi là nguyên tố *chuyển tiếp* hay *kim loại nặng*. Các nguyên tố của nhóm 16 được gọi là *chalkogen*, có nghĩa là vật tạo ra quặng; nhóm 17 là *halogen*, có nghĩa là vật tạo ra muối và nhóm 18 là *khí hiếm* là các nguyên tố (gần như) không có hợp chất hoá học. Các nhóm 13, 14 và 15 chứa các kim loại, á kim, chất lỏng duy nhất ở nhiệt độ phòng – brom – một vài chất khí và không kim loại; các nhóm này không có tên đặc biệt. Các nhóm 1 và từ 13 tới 17 đóng vai trò trung tâm đối với Hoá học đời sống; đúng ra, 96 % sinh chất được tạo thành từ C, O, N, H;* gần 4 % là của P, S, Ca, K, Na, Cl; các nguyên tố vi lượng là Mg, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Sn, Li, Mo, Se, Si, I, F, As, B chiếm phần còn lại. Trên 30 nguyên tố mang tính thiết yếu đối với động vật. Danh sách đầy đủ vẫn chưa có; các nguyên tố có khả năng tham gia danh sách này là Al, Br, Ge và W.

Nhiều nguyên tố có nhiều phiên bản với số neutron trong hạt nhân khác nhau, tức là khối lượng khác nhau; các *chất đồng vị* này – chúng được gọi như vậy vì *có cùng vị trí* Xem 291, Xem 298 trong Bảng tuần hoàn – có hoá tính giống nhau. Có trên 2000 đồng vị.

* 'Công thức trung bình' của sự sống gần đúng là $C_5H_{40}O_{18}N$.

BẢNG 36 Các nguyên tố cùng với nguyên tử số, khối lượng trung bình, bán kính nguyên tử và các tính chất chính.

TÊN	KÝ-HIỆU	NT. SỐ	KHỐI LƯỢNG TB.[a] ĐO BẰNG U (CÓ SAI SỐ), THỜI GIAN SỐNG DÀI NHẤT	BK-NT[e] ĐO BẰNG PM	TÍNH CHẤT CHÍNH, (VIỆC ĐẶT TÊN)[h] NGÀY KHÁM PHÁ VÀ CÔNG DỤNG
Actinium[b]	Ac	89	(227.0277(1)) 21.77(2) a	(188)	Kim loại đất hiếm có tính phóng xạ mạnh (Hy Lạp *aktis* tia) 1899, nguồn phát xạ alpha.
Aluminium	Al	13	26.981 538 (8) bền	118c, 143m	Kim loại nhẹ (Latin *alumen* phèn) 1827, vật liệu trong kết cấu của máy móc và sinh vật.
Americium[b]	Am	95	(243.0614(1)) 7.37(2) ka	(184)	Kim loại phóng xạ (Ý *America* từ Amerigo) 1945, sử dụng trong máy báo khói.
Antimony	Sb	51	121.760(1)[f] bền	137c, 159m, 205v	Á kim độc (Arab từ tiếng Latin *stibium*, từ tiếng Hy Lạp, Ai Cập, tên của khoáng chất chứa nó) thời cổ; cao su màu, dược phẩm, thành phần của enzyme.
Argon	Ar	18	39.948(1)[f] bền	(71n)	Khí hiếm (Hy Lạp *argos* thụ động, từ *anergos* không có năng lượng) 1894, thành phần thứ 3 của không khí, sử dụng trong việc hàn và laser.
Arsenic	As	33	74.921 60(2) bền	120c, 185v	Á kim độc (Hy Lạp *arsenikon* người thuần hoá thú) thời cổ, để đầu độc bồ câu, pha vào chất bán dẫn.
Astatine[b]	At	85	(209.9871(1)) 8.1(4) h	(140)	Halogen phóng xạ (Hy Lạp *astatos* không bền) 1940, không sử dụng.
Barium	Ba	56	137.327(7) bền	224m	Kim loại kiềm thổ (Hy Lạp *bary* nặng) 1808, trong đèn chân không, sơn, kỹ nghệ lọc dầu, pháo hoa và chẩn đoán bằng tia X.
Berkelium[b]	Bk	97	(247.0703(1)) 1.4(3) ka		Trong phòng thí nghiệm, có lẽ là kim loại (Berkeley, US) 1949, không sử dụng vì hiếm.
Beryllium	Be	4	9.012 182(3) bền	106c, 113m	Kim loại kiềm thổ độc (Hy Lạp *beryllos*, một khoáng chất) 1797, dùng trong hợp kim nhẹ, chất làm chậm.
Bismuth	Bi	83	208.980 40(1) bền	170m, 215v	Kim loại nghịch từ (Latin từ tiếng Đức *weisse Masse* khối trắng) 1753, nam châm, hợp kim, phòng hoả, mỹ phẩm, chất xúc tác, kỹ nghệ hạt nhân.

BẢNG 36 (Tiếp theo) Các nguyên tố cùng với nguyên tử số, khối lượng trung bình, bán kính nguyên tử và các tính chất chính.

TÊN	KÝ-HIỆU	NT. SỐ	KHỐI LƯỢNG TB.[a] ĐO BẰNG U (CÓ SAI SỐ), THỜI GIAN SỐNG DÀI NHẤT	BK-NT[e] ĐO BẰNG PM	TÍNH CHẤT CHÍNH, (VIỆC ĐẶT TÊN)[h] NGÀY KHÁM PHÁ VÀ CÔNG DỤNG
Bohrium[b]	Bh	107	(264.12(1)) 0.44 s[g]		Trong phòng thí nghiệm, có lẽ là kim loại (theo tên Niels Bohr) 1981, gặp trong lò phản ứng hạt nhân, không sử dụng.
Boron	B	5	10.811(7)[f] bền	83c	Á kim, bán dẫn (Latin *borax*, từ tiếng Arab sáng chói) 1808, dùng trong thuỷ tinh, chất tẩy, pháo hoa, nhiên liệu hoả tiễn, dược phẩm.
Bromine	Br	35	79.904(1) bền	120c, 185v	chất lỏng nâu đỏ (Hy Lạp *bromos* nặng mùi) 1826, thuốc diệt côn trùng, nhiếp ảnh, lọc nước, thuốc nhuộm, dược phẩm.
Cadmium	Cd	48	112.411(8)[f] bền	157m	Kim loại nặng, cắt được và 'kêu được' (khi bị uốn) (Hy Lạp *kadmeia*, khoáng chất kẽm carbonate có chứa nó) 1817, mạ điện, chất hàn, pin, chất lân quang trong TV, thuốc nhuộm.
Caesium	Cs	55	132.905 4519(2) bền	273m	Kim loại kiềm (Latin *caesius* xanh da trời) 1860, chất thu khí trong đèn chân không, tế bào quang điện, động cơ ion, đồng hồ nguyên tử.
Calcium	Ca	20	40.078(4)[f] bền	197m	Kim loại kiềm thổ (Latin *calcis* phấn) thời cổ, 1880, trong đá và xương, chất khử, hợp kim.
Californium[b]	Cf	98	(251.0796(1)) 0.90(5) ka		Trong phòng thí nghiệm, có lẽ là kim loại, chất phát neutron mạnh (Latin *calor* nhiệt và *fornicare* có tình dục, mảnh đất của ái tình :-) 1950, nguồn neutron, Địa vật lý thăm dò.
Carbon	C	6	12.0107(8)[f] bền	77c	Tạo nên than và kim cương (Latin *carbo* than) thời cổ, tạo dựng phần lớn sinh vật.
Cerium	Ce	58	140.116(1)[f] bền	183m	Kim loại đất hiếm (theo tên tiểu hành tinh Ceres, nữ thần La Mã) 1803, quẹt, măng sông đèn, sản xuất thuỷ tinh, lò nướng tự làm sạch, đèn hồ quang trong máy chiếu phim, chất xúc tác, luyện kim.
Chlor	Cl	17	35.453(2)[f] bền	102c, 175v	Khí màu lục (Hy Lạp *chloros* lục vàng) 1774, nước uống, polymer, giấy, thuốc nhuộm, dệt, dược phẩm, thuốc sát trùng, dung môi, sơn, cao su.

BẢNG 36 (Tiếp theo) Các nguyên tố cùng với nguyên tử số, khối lượng trung bình, bán kính nguyên tử và các tính chất chính.

Tên	Ký-hiệu	NT. số	Khối lượng TB.[a] đo bằng u (có sai số), thời gian sống dài nhất	BK-NT[e] đo bằng pm	Tính chất chính, (việc đặt tên)[h] ngày khám phá và công dụng
Chromium	Cr	24	51.9961(6) bền	128m	Kim loại chuyển tiếp (Hy Lạp *chromos* màu sắc) 1797, tôi thép, thép không rỉ, hợp kim, mạ điện, phẩm nhuộm thuỷ tinh lục, chất xúc tác.
Cobalt	Co	27	58.933 195(5) bền	125m	Kim loại chuyển tiếp thiết từ (Đức *Kobold* quỷ) 1694, một phần của vitamin B_{12}, hợp kim có từ tính, hợp kim bền, phẩm nhuộm men, mực, thức ăn gia súc.
Copernicium[b]	Cn	112	(285) 34 s[g]		Trong phòng thí nghiệm, 1996, không sử dụng.
Copper	Cu	29	63.546(3)[f] bền	128m	Kim loại đỏ (Latin *cuprum* tên đảo Cyprus) thời cổ, thành phần của enzyme, chất dẫn điện, đồng thiếc, đồng thau, hợp kim, thuốc diệt tảo, ...
Curium[b]	Cm	96	(247.0704(1)) 15.6(5) Ma		Chất phóng xạ mạnh, màu bạc (theo tên Pierre và Marie Curie) 1944, nguồn phóng xạ.
Darmstadtium[b]	Ds	110	(271) 1.6 min[g]		Trong phòng thí nghiệm (theo tên thành phố Đức) 1994, không sử dụng.
Dubnium[b]	Db	105	(262.1141(1)) 34(5) s		Trong phòng thí nghiệm, phóng xạ (Dubna, thành phố Nga) 1967, không sử dụng (trước kia có tên hahnium).
Dysprosium	Dy	66	162.500(1)[f] bền	177m	Kim loại đất hiếm (Hy Lạp *dysprositos* khó kiếm) 1886, vật liệu laser, nguồn hồng ngoại và trong kỹ nghệ hạt nhân.
Einsteinium[b]	Es	99	(252.0830(1)) 472(2) d		Trong phòng thí nghiệm, phóng xạ (theo tên Albert Einstein) 1952, không sử dụng.
Erbium	Er	68	167.259(3)[f] bền	176m	Kim loại đất hiếm (Ytterby, thị trấn ở Thuỵ Điển) 1843, luyện kim, sợi quang.
Europium	Eu	63	151.964(1)[f] bền	204m	Kim loại đất hiếm (theo tên lục địa) 1901, chất lân quang màu đỏ cho đèn hình TV.
Fermium[b]	Fm	100	(257.0901(1)) 100.5(2) d		Trong phòng thí nghiệm, (theo tên Enrico Fermi) 1952, không sử dụng.
Flerovium[b]	Fl	114	(289)	2.7 s[g]	1999, không sử dụng.
Fluor	F	9	18.998 4032(5) bền	62c, 147v	Hơi halogen (từ fluorine, một khoáng chất, Hy Lạp *fluo* dòng chảy) 1886, polymer, kem đánh răng.

BẢNG 36 (Tiếp theo) Các nguyên tố cùng với nguyên tử số, khối lượng trung bình, bán kính nguyên tử và các tính chất chính.

TÊN	KÝ-HIỆU	NT. SỐ	KHỐI LƯỢNG TB.[a] ĐO BẰNG U (CÓ SAI SỐ), THỜI GIAN SỐNG DÀI NHẤT	BK-NT[e] ĐO BẰNG PM	TÍNH CHẤT CHÍNH, (VIỆC ĐẶT TÊN)[h] NGÀY KHÁM PHÁ VÀ CÔNG DỤNG
Francium[b]	Fr	87	(223.0197(1)) 22.0(1) min	(278)	Kim loại phóng xạ (tên nước Pháp) 1939, không sử dụng.
Gadolinium	Gd	64	157.25(3)[f] bền	180m	Kim loại đất hiếm (theo tên Johan Gadolin) 1880, laser, chất lân quang.
Gallium	Ga	31	69.723(1) bền	125c, 141m	Kim loại gần như lỏng (Latin tên người khám phá và quốc gia, Pháp) 1875, quang điện tử học.
Germanium	Ge	32	72.64(1) bền	122c, 195v	Chất bán dẫn (từ tên nước Đức) 1886, điện tử.
Vàng	Au	79	196.966 569(4) bền	144m	Kim loại quý nặng (Sanskrit *jval* chiếu sáng, Latin aurum) thời cổ, điện tử, quý kim.
Hafnium	Hf	72	178.49(2)[c] bền	158m	Kim loại (tên Latin của Copenhagen) 1923, hợp kim, dây tóc đèn nóng sáng.
Hassium[b]	Hs	108	(277) 16.5 min[g]		Nguyên tố phóng xạ (tên Latin của tiểu bang Hessen, Đức) 1984, không sử dụng.
Helium	He	2	4.002 602(2)[f] bền	(31n)	Khí hiếm (Hy Lạp *helios* Mặt trời) nơi khám phá 1895, khinh khí cầu, sao, khí dùng cho thợ lặn và kỹ thuật siêu hàn.
Holmium	Ho	67	164.930 32(2) bền	177m	Kim loại (Stockholm, thủ đô Thuỵ Điển) 1878, hợp kim.
Hydrogen	H	1	1.007 94(7)[f] bền	30c	khí (Hy Lạp, vật tạo ra nước) 1766, sao và vũ trụ.
Indium	In	49	114.818(3) bền	141c, 166m	Kim loại mềm (Hy Lạp *indikon* màu chàm) 1863, chất hàn, tế bào quang điện.
Iod	I	53	126.904 47(3) bền	140c, 198v	Chất rắn xanh đen (Hy Lạp, *iodes* màu tím) 1811, nhiếp ảnh.
Iridium	Ir	77	192.217(3) bền	136m	Kim loại quý (Hy Lạp *iris* cầu vồng) 1804, lớp tiếp xúc điện.
Sắt	Fe	26	55.845(2) bền	127m	Kim loại (Ấn Âu *ayos* kim loại, Latin ferrum) thời cổ, luyện kim.
Krypton	Kr	36	83.798(2)[f] bền	(88n)	Khí hiếm (Hy Lạp *kryptos* ẩn giấu) 1898, laser.
Lanthanum	La	57	138.905 47(7)[c,f] bền	188m	Kim loại đất hiếm hoạt động (Hy Lạp *lanthanein* bị che dấu) 1839, đèn, thuỷ tinh đặc biệt.
Lawrencium[b]	Lr	103	(262.110 97(1)) 3.6(3) h		Xuất hiện trong phản ứng (theo tên Ernest Lawrence) 1961, không sử dụng.

BẢNG 36 (Tiếp theo) Các nguyên tố cùng với nguyên tử số, khối lượng trung bình, bán kính nguyên tử và các tính chất chính.

TÊN	KÝ-HIỆU	NT. SỐ	KHỐI LƯỢNG TB.[a] ĐO BẰNG U (CÓ SAI SỐ), THỜI GIAN SỐNG DÀI NHẤT	BK-NT[e] ĐO BẰNG PM	TÍNH CHẤT CHÍNH, (VIỆC ĐẶT TÊN)[h] NGÀY KHÁM PHÁ VÀ CÔNG DỤNG
Chì	Pb	82	207.2(1)[c,f] bền	175m	Kim loại nặng, độc, dễ dát mỏng (Latin *plumbum*) thời cổ, accu, che chắn phóng xạ, sơn.
Lithium	Li	3	6.941(2)[f] bền	156m	Kim loại kiềm nhẹ, nhiệt dung riêng lớn (Hy Lạp *lithos* đá) 1817, pin, thuốc chống trầm cảm, hợp kim, dung hợp hạt nhân, hoá chất.
Livermorium[b]	Lv	116	(293)	61 ms[g]	Công bố nhầm năm 1999, công bố đúng năm 2000, không sử dụng.
Lutetium	Lu	71	174.967(1)[f] bền	173m	Kim loại đất hiếm (Latin *Lutetia* Paris) 1907, chất xúc tác.
Magnesium	Mg	12	24.3050(6) bền	160m	Kim loại kiềm thổ nhẹ, phổ biến (từ Magnesia, địa hạt ở Thessalia, Hy Lạp) 1755, hợp kim, pháo hoa, tổng hợp hoá chất và dược phẩm, trong diệp lục tố.
Manganese	Mn	25	54.938 045(5) bền	126m	Kim loại giòn (Ý *manganese*, một khoáng chất) 1774, hợp kim, thạch anh tím và permanganate.
Meitnerium[b]	Mt	109	(268.1388(1)) 0.070 s[g]		trong phản ứng hạt nhân (theo tên Lise Meitner) 1982, không sử dụng.
Mendelevium[b]	Md	101	(258.0984(1)) 51.5(3) d		trong phản ứng hạt nhân (theo tên Дмитрии Иванович Менделеев Dmitriy Ivanovich Mendeleyev) 1955, không sử dụng.
Mercury	Hg	80	200.59(2) bền	157m	Kim loại nặng lỏng (Latin thần Mercurius, Hy Lạp *hydrargyrum* bạc lỏng) thời cổ, công tắc, pin, đèn, hỗn hống.
Molybdenum	Mo	42	95.94(2)[f] bền	140m	Kim loại (Hy Lạp *molybdos* chì) 1788, hợp kim, chất xúc tác, trong enzyme và chất bôi trơn.
Moscovium[b]	Mc	115	(288)	8 ms[g]	(Moscow) 2004, không sử dụng.
Neodymium	Nd	60	144.242(3)[c,f] bền	182m	(Hy Lạp *neos* và *didymos* song tinh mới) 1885, nam châm.
Neon	Ne	10	20.1797(6)[f] bền	(36n)	Khí hiếm (Hy Lạp *neos* mới) 1898, trong đèn, laser và kỹ thuật siêu hàn.

BẢNG 36 (Tiếp theo) Các nguyên tố cùng với nguyên tử số, khối lượng trung bình, bán kính nguyên tử và các tính chất chính.

Tên	Ký-hiệu	NT. số	Khối lượng TB.[a] đo bằng u (có sai số), thời gian sống dài nhất	BK-NT[e] đo bằng pm	Tính chất chính, (việc đặt tên)[h] ngày khám phá và công dụng
Neptunium[b]	Np	93	(237.0482(1)) 2.14(1) Ma		Kim loại phóng xạ (hành tinh Neptune trong Thái dương hệ) 1940, trong lò phản ứng hạt nhân, dùng trong việc phát hiện neutron, trong quân đội.
Nickel	Ni	28	58.6934(2) bền	125m	Kim loại (Đức *Nickel* quỷ) 1751, tiền xu, thép không rỉ, pin, chất xúc tác.
Nihonium[b]	Nh	113	(284)	0.48 s[g]	(Nihon là tên Nhật Bản bằng tiếng Nhật) 2003, không sử dụng.
Niobium	Nb	41	92.906 38(2) bền	147m	Kim loại dễ kéo sợi (Hy Lạp Niobe, con gái của Tantalos) 1801, hàn hồ quang, hợp kim, nữ trang, chất siêu dẫn.
Nitrogen	N	7	14.0067(2)[f] bền	70c, 155v	Khí lưỡng nguyên tử (Hy Lạp, vật tạo ra muối diêm) 1772, trong không khí, sinh vật, Viagra, phân bón, thuốc nổ.
Nobelium[b]	No	102	(259.1010(1)) 58(5) min		(theo tên Alfred Nobel) 1958, không sử dụng.
Oganesson[b]	Og	118	(294)	0.9 ms[g]	công bố sai năm 1999, công bố đúng từ 2006, (theo tên Yuri Oganessian) không sử dụng.
Osmium	Os	76	190.23(3)[f] bền	135m	Kim loại nặng (Hy Lạp *osme* mùi) 1804, phát hiện dấu vân tay, hợp kim cứng.
Oxygen	O	8	15.9994(3)[f] bền	66c, 152v	Khí lưỡng nguyên tử trong suốt (Hy Lạp 'chất tạo ra acid') 1774, sự cháy, phục hồi máu, tạo ra đá tảng và đá cuội, trong vô số hợp chất, màu đỏ của cực quang.
Palladium	Pd	46	106.42(1)[f] bền	138m	Kim loại nặng (tên tiểu hành tinh Pallas, nữ thần Hy Lạp) 1802, hợp kim, vàng trắng, chất xúc tác, lưu trữ hydride kim loại.
Phosphor	P	15	30.973 762(2) bền	109c, 180v	Chất rắn mềm, trắng, độc (Hy Lạp *phosphoros* vật mang nhẹ) 1669, phân bón, thuỷ tinh, sứ, thép, hợp kim, sinh vật, xương.

BẢNG 36 (Tiếp theo) Các nguyên tố cùng với nguyên tử số, khối lượng trung bình, bán kính nguyên tử và các tính chất chính.

TÊN	KÝ-HIỆU	NT. SỐ	KHỐI LƯỢNG TB.[a] ĐO BẰNG U (CÓ SAI SỐ), THỜI GIAN SỐNG DÀI NHẤT	BK-NT[e] ĐO BẰNG PM	TÍNH CHẤT CHÍNH, (VIỆC ĐẶT TÊN)[h] NGÀY KHÁM PHÁ VÀ CÔNG DỤNG
Platinum	Pt	78	195.084(9) bền	139m	Kim loại nặng, quý, trắng bạc, dễ kéo sợi (Tây Ban Nha *platina* bạc nhỏ) tiền-Columbia, rồi 1735, hợp kim chống ăn mòn, nam châm, lò luyện kim, chất xúc tác, pin nhiên liệu, hệ bảo vệ cathode cho tàu và đường ống lớn; chất xúc tác, dây platinum nóng đỏ phát sáng khi đặt trong hơi rượu methyl dùng sưởi ấm tay.
Plutonium	Pu	94	(244.0642(1)) 80.0(9) Ma		Kim loại phát xạ alpha cực độc (tên hành tinh) tổng hợp năm 1940, tìm thấy trong thiên nhiên năm 1971, bom hạt nhân, nguồn năng lượng cho vệ tinh, máy đo do phi thuyền Apollo mang lên Mặt trăng.
Polonium	Po	84	(208.9824(1)) 102(5) a	(140)	Kim loại dễ bay hơi, phát xạ Alpha (tên nước Ba Lan) 1898, nguồn nhiệt điện trong phi thuyền không gian, nguồn neutron khi trộn với beryllium; dùng khử tĩnh điện tích trong nhà máy, bàn chải bụi trên phim ảnh.
Potassium	K	19	39.0983(1) bền	238m	Kim loại nhẹ, cắt được (Đức *Pottasche*, Latin *kalium* từ tiếng Arab *quilyi*, cây dùng để sản xuất potash) 1807, thành phần của nhiều muối và đá, chất cốt yếu cho sự sống, phân bón, kỹ nghệ hoá học.
Praeseodymium	Pr	59	140.907 65(2) bền	183m	Kim loại đất hiếm trắng, dát mỏng được (Hy Lạp *praesos didymos* song tinh lục) 1885, quẹt, vật liệu cho đèn hồ quang sử dụng trong kỹ nghệ chiếu phim dành cho đèn chiếu sáng studio và đèn chiếu, thuỷ tinh, phẩm nhuộm men, kính bảo vệ mắt của thợ hàn.
Promethium[b]	Pm	61	(144.9127(1)) 17.7(4) a	181m	Kim loại đất hiếm phóng xạ (nhân vật Prometheus trong thần thoại Hy Lạp) 1945, nguồn β và kích thích chất lân quang.
Protactinium	Pa	91	(231.035 88(2)) 32.5(1) ka		Kim loại phóng xạ (Hy Lạp *protos* đầu tiên, vì nó phân rã thành actinium) 1917, tìm thấy trong thiên nhiên, không sử dụng.

BẢNG 36 (Tiếp theo) Các nguyên tố cùng với nguyên tử số, khối lượng trung bình, bán kính nguyên tử và các tính chất chính.

TÊN	KÝ-HIỆU	NT. SỐ	KHỐI LƯỢNG TB.[a] ĐO BẰNG U (CÓ SAI SỐ), THỜI GIAN SỐNG DÀI NHẤT	BK-NT[e] ĐO BẰNG PM	TÍNH CHẤT CHÍNH, (VIỆC ĐẶT TÊN)[h] NGÀY KHÁM PHÁ VÀ CÔNG DỤNG
Radium	Ra	88	(226.0254(1)) 1599(4) a	(223)	Kim loại phóng xạ mạnh (Latin *radius* tia) 1898, không còn sử dụng; sơn phản quang, nguồn phóng xạ, dược phẩm.
Radon	Rn	86	(222.0176(1)) 3.823(4) d	(130n)	Khí hiếm phóng xạ (từ tên cũ 'sự xạ khí của radium') 1900, không còn sử dụng, tìm thấy trong đất, gây ung thư phổi.
Rhenium	Re	75	186.207(1)[c] bền	138m	Kim loại chuyển tiếp (Latin *rhenus* sông Rhine) 1925, tim đèn cho khối phổ kế và máy đo áp suất ion hoá, chất siêu dẫn, cặp nhiệt điện, đèn flash, chất xúc tác.
Rhodium	Rh	45	102.905 50(2) bền	135m	Kim loại trắng (Hy Lạp *rhodon* bông hồng) 1803, tôi hợp kim platinum và palladium, mạ điện, chất xúc tác.
Roentgenium[b]	Rg	111	(272.1535(1)) 1.5 ms[g]		trong phòng thí nghiệm (theo tên Conrad Roentgen) 1994, không sử dụng.
Rubidium	Rb	37	85.4678(3)[f] bền	255m	Kim loại kiềm trắng bạc (Latin *rubidus* đỏ) 1861, tế bào quang điện, thuỷ tinh quang học, chất điện giải rắn.
Ruthenium	Ru	44	101.107(2)[f] bền	134m	Kim loại trắng (Latin *Rhuthenia* Nga) 1844, hợp kim platinum và palladium, chất siêu dẫn, chất xúc tác; tetroxide thì độc và dễ nổ.
Rutherfordium[b]	Rf	104	(261.1088(1)) 1.3 min[g]		Transactinide phóng xạ (theo tên Ernest Rutherford) 1964, không sử dụng.
Samarium	Sm	62	150.36(2)[c,f] bền	180m	Kim loại đất hiếm trắng bạc (tên khoáng chất samarskite, tên của Wassily Samarski) 1879, nam châm, thuỷ tinh quang học, chất pha tạp của laser, chất lân quang, trong nguồn sáng công suất lớn.
Scandium	Sc	21	44.955 912(6) bền	164m	Kim loại trắng bạc (Latin *Scansia* Thuỵ Điển) 1879, oxide được sử dụng trong đèn hơi thuỷ ngân cường độ lớn, đồng vị phóng xạ làm chất đánh dấu.
Seaborgium[b]	Sg	106	266.1219(1) 21 s[g]		Transurane phóng xạ (theo tên Glenn Seaborg) 1974, không sử dụng.

BẢNG 36 (Tiếp theo) Các nguyên tố cùng với nguyên tử số, khối lượng trung bình, bán kính nguyên tử và các tính chất chính.

TÊN	KÝ-HIỆU	NT. SỐ	KHỐI LƯỢNG TB.[a] ĐO BẰNG U (CÓ SAI SỐ), THỜI GIAN SỐNG DÀI NHẤT	BK-NT[e] ĐO BẰNG PM	TÍNH CHẤT CHÍNH, (VIỆC ĐẶT TÊN)[h] NGÀY KHÁM PHÁ VÀ CÔNG DỤNG
Selenium	Se	34	78.96(3)[f] bền	120c, 190v	Chất bán dẫn đỏ, đen, xám (Hy Lạp *selene* Mặt trăng) 1818, phép chụp ảnh tĩnh điện, sản xuất thuỷ tinh, mực in ảnh, phẩm nhuộm men.
Silic	Si	14	28.0855(3)[f] bền	105c, 210v	Bán dẫn xám sáng (Latin *silex* sỏi) 1823, vỏ Trái đất, điện tử, cát, bê tông, gạch, thuỷ tinh, polymer, pin Mặt trời, thiết yếu cho sự sống.
Bạc	Ag	47	107.8682(2)[f] bền	145m	Kim loại trắng có độ dẫn nhiệt và dẫn điện cao nhất (Latin *argentum*, Hy Lạp *argyros*) thời cổ, nhiếp ảnh, hợp kim, tạo mưa.
Sodium	Na	11	22.989 769 28(2) bền	191m	Kim loại nhẹ, hoạt động (Arab *souwad* soda, Ai Cập và Arab *natrium*) thành phần của nhiều muối, xà bông, giấy, soda, muối diêm, borax, thiết yếu cho sự sống.
Strontium	Sr	38	87.62(1)[f] bền	215m	Kim loại nhẹ ánh bạc, bốc cháy tự phát (Strontian, thị trấn của Scotland) 1790, dùng trong thuỷ tinh đèn hình TV, nam châm, vật liệu quang học.
Sulphur	S	16	32.065(5)[f] bền	105c, 180v	Chất rắn màu vàng (Latin) thời cổ, thuốc súng, acid sulphuric, lưu hoá cao su, diệt nấm trong rượu, thiết yếu cho sự sống; một số vi khuẩn sử dụng sulphur thay vì oxygen.
Tantalum	Ta	73	180.947 88(2) bền	147m	Kim loại nặng (Hy Lạp Tantalos, nhân vật thần thoại) 1802, hợp kim, dụng cụ phẫu thuật, tụ điện, lò chân không, thuỷ tinh.
Technetium[b]	Tc	43	(97.9072(1)) 6.6(10) Ma	136m	Chất phóng xạ (Hy Lạp *technetos* nhân tạo) 1939, chất đánh dấu phóng xạ, công nghệ hạt nhân.
Tellurium	Te	52	127.60(3)[f] bền	139c, 206v	Chất bán dẫn giòn, có mùi tỏi (Latin *tellus* Trái đất) 1783, hợp kim, thuỷ tinh.
Tennessine[b]	Ts	117	(294)	78 ms[g]	(Tennessee) 2010, không sử dụng.
Terbium	Tb	65	158.925 35(2) bền	178m	Kim loại đất hiếm dễ dát mỏng (Ytterby, thị trấn của Thuỵ Điển) 1843, chất pha tạp trong vật liệu quang học.

BẢNG 36 (Tiếp theo) Các nguyên tố cùng với nguyên tử số, khối lượng trung bình, bán kính nguyên tử và các tính chất chính.

TÊN	KÝ-HIỆU	NT. SỐ	KHỐI LƯỢNG TB.[a] ĐO BẰNG U (CÓ SAI SỐ), THỜI GIAN SỐNG DÀI NHẤT	BK-NT[e] ĐO BẰNG PM	TÍNH CHẤT CHÍNH, (VIỆC ĐẶT TÊN)[h] NGÀY KHÁM PHÁ VÀ CÔNG DỤNG
Thallium	Tl	81	204.3833(2) bền	172m	Kim loại nặng, mềm, độc (Hy Lạp *thallos* nhánh cây) 1861, độc dược, máy dò hồng ngoại.
Thorium	Th	90	232.038 06(2)[d,f] 14.0(1) Ga	180m	Chất phóng xạ (Nordic thần Thor, như trong 'Thứ 5') 1828, tìm thấy trong thiên nhiên, làm nóng Trái đất, oxide trong măng sông đèn cho những người cắm trại, hợp kim, mạ, năng lượng hạt nhân.
Thulium	Tm	69	168.934 21(2) bền	175m	Kim loại đất hiếm (Thule, tên thần thoại của Scandinavia) 1879, trong monazite, laser, máy phát hiện bức xạ.
Thiếc	Sn	50	118.710(7)[f] bền	139c, 210v, 162m	Kim loại xám, khi uốn cong thì phát ra 'tiếng kêu của thiếc' (Latin *stannum*) thời cổ, sơn, đồng thiếc, chất siêu dẫn.
Titanium	Ti	22	47.867(1) bền	146m	Kim loại (Anh hùng Titanos của Hy Lạp) 1791, hợp kim, kim cương giả.
Tungsten	W	74	183.84(1) bền	141m	Kim loại nặng, khó nóng chảy (Thuỵ Điển *tung sten* đá nặng, tên Đức *Wolfram*) 1783, đèn tròn.
Uranium	U	92	238.028 91(3)[d,f] $4.468(3) \cdot 10^9$ a	156m	Chất phóng xạ cường độ cao (hành tinh Uranus, thần bầu trời của Hy Lạp) 1789, tìm thấy trong pechblende và các khoáng chất khác, năng lượng hạt nhân.
Vanadium	V	23	50.9415(1) bền	135m	Kim loại (Vanadis, nữ thần sắc đẹp của scandinavia) 1830, dùng trong thép.
Xenon	Xe	54	131.293(6)[f] bền	(103n) 200v	Khí hiếm (Hy Lạp *xenos* xa lạ) 1898, dùng trong đèn và laser.
Ytterbium	Yb	70	173.04(3)[f] bền	174m	Kim loại nặng dễ dát mỏng (Ytterby, thị trấn của Thuỵ Điển) 1878, dùng trong chất siêu dẫn.
Yttrium	Y	39	88.905 85(2) bền	180m	Kim loại nhẹ dễ dát mỏng (Ytterby, thị trấn của Thuỵ Điển) 1794, dùng trong laser.
Kẽm	Zn	30	65.409(4) bền	139m	Kim loại nặng (Đức *Zinke* tai lửa Mặt trời) thời cổ, bảo vệ sắt không bị rỉ sét.

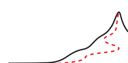
BẢNG 36 (Tiếp theo) Các nguyên tố cùng với nguyên tử số, khối lượng trung bình, bán kính nguyên tử và các tính chất chính.

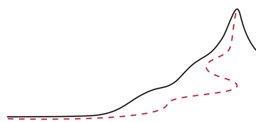
TÊN	KÝ-HIỆU	NT. SỐ	KHỐI LƯỢNG TB.[a] ĐO BẰNG U (CÓ SAI SỐ), THỜI GIAN SỐNG DÀI NHẤT	BK-NT[e] ĐO BẰNG PM	TÍNH CHẤT CHÍNH, (VIỆC ĐẶT TÊN)[h] NGÀY KHÁM PHÁ VÀ CÔNG DỤNG
Zirconium	Zr	40	91.224(2)[f] bền	160m	Kim loại nặng (từ khoáng chất zircon, theo tiếng Arab *zargum* màu của vàng) 1789, dụng cụ hoá và phẫu thuật, kỹ nghệ hạt nhân.

a. Đơn vị khối lượng nguyên tử được định nghĩa là $1\,\mathrm{u} = \frac{1}{12}m(^{12}\mathrm{C})$, như vậy $1\,\mathrm{u} = 1.660\,5402(10)\,\mathrm{yg}$. Đối với các nguyên tố tìm thấy trên Trái đất, đó là khối lượng nguyên tử *trung bình* của hỗn hợp đồng vị thường gặp trong thiên nhiên, với sai số có chữ số cuối cùng nằm
Xem 298
trong ngoặc. Đối với các nguyên tố không tìm thấy trên Trái đất, đó là khối lượng của đồng vị *sống lâu nhất*; khi nó không phải là một số trung bình, theo thông lệ nó được viết trong ngoặc.
b. Nguyên tố không tìm thấy trên Trái đất vì thời gian sống ngắn.
c. Nguyên tố có ít nhất 1 đồng vị phóng xạ.
d. Nguyên tố không có đồng vị bền.
e. Nói một cách chặt chẽ, không có *bán kính nguyên tử*. Vì các nguyên tử là các đám mây, chúng không có ranh giới. Có thể có nhiều định nghĩa gần đúng về 'kích thước' của nguyên tử. Thường thường, bán kính được xác định theo một cách tiện cho việc ước lượng khoảng cách giữa các
Xem 299
nguyên tử. Khoảng cách này thay đổi theo các loại liên kết khác nhau. Trong bảng này, bán kính đối với các liên kết kim loại mang nhãn m, bán kính đối với các liên kết cộng hoá tri (đơn) mang
Xem 299
nhãn carbon c và bán kính Van der Waals là v. Bán kính khí hiếm là n. Nên nhớ rằng giá trị trong tài liệu thay đổi khoảng 10 %; giá trị không có trong tài liệu được đặt trong dấu ngoặc.

Bán kính cộng hoá trị có thể lên tới 0.1 nm nhỏ hơn bán kính kim loại đối với các nguyên tố ở (phần dưới) bên trái của Bảng tuần hoàn; trên (toàn bộ) phía bên phải thì chủ yếu là bán kính kim loại. Ở chính giữa, sự khác biệt giữa hai nguyên tố giảm dần theo chiều qua phải. Bạn có
Câu đố 178 s
thể giải thích điều này không? Ngoài ra, bán kính ion khác nhiều với bán kính nguyên tử và cả 2 phụ thuộc vào điện tích ion và chính nguyên tố đó.

Tất cả các giá trị này đều của nguyên tử ở trạng thái cơ bản. Khi nguyên tử ở trạng thái kích thích, giá trị sẽ lớn hơn hàng trăm lần; tuy vậy, các nguyên tử kích thích không tạo ra chất rắn hay các hợp chất hoá học.
f. Hợp phần gồm các đồng vị nên khối lượng nguyên tử trung bình của các nguyên tố thay đổi tuỳ theo nơi nó được khai thác, sự xử lý của con người và có thể nằm ngoài giá trị đã cho. Thí dụ như khối lượng nguyên tử của lithium thương mại nằm trong khoảng từ 6.939 đến 6.996 u. Khối lượng của các đồng vị đã biết theo đơn vị khối lượng nguyên tử có 9 (hay nhiều hơn) chữ
Xem 291
số có nghĩa, và ít hơn 1 hay 2 chữ số nếu tính bằng kg. Như vậy sai số trong khối lượng nguyên
Xem 298
tử bắt nguồn từ sự khác biệt trong hợp phần đồng vị.
g. Sai số trong thời gian sống thì bất đối xứng và không được biết rõ.
h. Chi tiết bổ sung về tên nguyên tố có thể tìm thấy ở trang elements.vanderkrogt.net.





Phụ lục 15

Đại số, hình dạng và nhóm

Các toán gia thích tổng quát hoá các khái niệm. Một trong những khái niệm tổng quát nhất là khái niệm *không gian*. Tìm hiểu các định nghĩa và tổng quát hoá toán học đồng nghĩa với tư duy một cách chính xác. Phần phụ lục của quyển IV trước đã giới thiệu sơ lược về các loại *không gian* quan trọng trong Vật lý; phụ lục này giới thiệu về *các đại số* quan trọng trong Vật lý.

Các đại số

Thuật ngữ *đại số* được sử dụng trong toán học với 3 nghĩa khác nhau và ít có liên hệ với nhau. Đầu tiên, nó nói đến một phần của Toán học trong câu nói 'Khi đi học tôi ghét môn Đại số'. Thứ 2, nó nói đến tập hợp các quy tắc hình thức mà các đối tượng trừu tượng phải tuân thủ, như trong phát biểu 'Đại số tensor'. Sau cùng – và là nghĩa duy nhất được sử dụng ở đây – Đại số là một loại cấu trúc toán học *đặc biệt*.

Theo nghĩa trực giác, đại số là một tập hợp các vector cùng với một phép nhân vector xác định trên tập hợp đó. Nói chính xác hơn, một đại số (đơn nguyên, kết hợp) là một không gian vector (trên trường K) cũng là một vành (đơn nguyên). (Khái niệm này bắt nguồn từ Benjamin Peirce (b. 1809 Salem, d. 1880 Cambridge), cha của Charles Sanders Peirce.) Vành là một tập hợp có định nghĩa một phép cộng và một phép nhân – giống như các số nguyên. Như vậy trong một đại số (thường) có 3 loại phép nhân:

Quyển IV, trang 224

- phép nhân đại số (chính): tích 2 vector x và y là một vector $z = xy$;
- phép nhân với số vô hướng: nhân c với vector x là một vector $y = cx$;
- nếu không gian vector là một không gian nội tích: tích vô hướng của 2 phần tử đại số (vector) x và y là một số vô hướng $c = x \cdot y$;

Để định nghĩa chính xác một đại số ta chỉ cần định nghĩa các tính chất của phép nhân (chính) và xác định trường số K. Một *đại số* được định nghĩa bằng các tiên đề sau

$$x(y+z) = xy + xz \quad , \quad (x+y)z = xz + yz \quad \textit{tính phân bố của phép nhân}$$
$$c(xy) = (cx)y = x(cy) \quad \textit{tính song tuyến tính} \tag{139}$$

đối với mọi vector x, y, z và vô hướng $c \in$ K. Để nhấn mạnh các tính chất này, đại số còn được gọi là đại số *tuyến tính.*

Thí dụ như tập hợp các phép biến đổi tuyến tính của một không gian tuyến tính n chiều (như phép tĩnh tiến trên mặt phẳng, trong không gian hay thời gian) là một đại số tuyến tính nếu phép hợp được xem như là phép nhân. Tương tự là tập hợp các biến

động lực của một hệ cơ lượng tử.*

Đại số kết hợp là đại số có một phép nhân kèm theo một tính chất bổ sung là

$$x(yz) = (xy)z \quad \textit{tính kết hợp} . \tag{141}$$

Phần lớn các đại số trong Vật lý đều có tính kết hợp và đơn nguyên. **

Do đó trong vật lý toán, một đại số kết hợp đơn nguyên tuyến tính thường được gọi đơn giản là một đại số. Tập hợp các bội của phần tử đơn vị 1 của đại số được gọi là *trường của các vô hướng* scal(A) của đại số A. Trường của các vô hướng cũng là một đại số con của A. Trường của các vô hướng và các vô hướng có tính chất giống nhau.

Ta hãy xét một vài thí dụ. Tập hợp các đa thức 1 biến (hay nhiều biến) tạo thành một
Câu đố 180 e đại số. Nó có tính giao hoán và số chiều vô hạn. Các đa thức không đổi tạo thành trường của các vô hướng.

Tập hợp matrix $n \times n$ với các phép toán thông thường cũng tạo thành một đại số. Nó có n^2 chiều. Các matrix chéo (matrix có tất cả các phần tử ngoài đường chéo đều bằng 0) có các phần tử chéo có cùng giá trị tạo thành một trường của các vô hướng. Tích vô
Câu đố 181 ny hướng của 2 matrix được định nghĩa như thế nào?

Tập hợp các hàm số có giá trị thực trên một tập hợp cũng tạo thành một đại số. Bạn có
Câu đố 182 s thể xác định phép nhân không? Các hàm không đổi tạo thành trường của các vô hướng.

Một *đại số sao*, cũng được viết là *đại số-$*$*, là một đại số trên trường *số phức* và một ánh xạ $* : A \to A,\ x \mapsto x^*$, được gọi là một *phép đối hợp*, có các tính chất

$$\begin{aligned} (x^*)^* &= x \\ (x+y)^* &= x^* + y^* \\ (cx)^* &= \bar{c}x^* \quad \text{với mọi} \quad c \in \mathbb{C} \\ (xy)^* &= y^* x^* \end{aligned} \tag{142}$$

đúng với mọi phần tử x, y của đại số A. Phần tử x^* được gọi là *đối hợp* của x. Đại số sao là loại đại số chính được sử dụng trong Cơ học lượng tử vì các biến động lực cơ lượng tử tạo thành một đại số-$*$.

---

* *Phép biến đổi tuyến tính* là các ánh xạ từ không gian vector vào chính nó, với tính chất tổng và tích vô hướng của vector được biến đổi thành tổng và tích vô hướng tương ứng của các vector bị biến đổi. Bạn có
Câu đố 179 s thể xác định được tập hợp mọi phép biến đổi tuyến tính trong mặt phẳng không? và trong không gian 3 chiều? không gian Minkowski?

Mọi phép biến đổi tuyến tính biến đổi một số vector đặc biệt, được gọi là *vector riêng* (từ tiếng Đức *eigen* có nghĩa là 'tự bản thân') thành bội của chúng. Nói cách khác, nếu T là phép biến đổi e là vector và

$$T(e) = \lambda e \tag{140}$$

trong đó λ là một vô hướng, thì vector e được gọi là *vector riêng* của T và λ là *trị riêng* liên kết. Tập hợp mọi trị riêng của một phép biến đổi T được gọi là *phổ* của T. Các nhà vật lý không quan tâm nhiều tới các khái niệm toán học này cho tới khi họ khám phá ra Thuyết lượng tử. Thuyết lượng tử chứng tỏ rằng các
Quyển IV, trang 89 biến động lực là các phép biến đổi trong không gian Hilbert, vì mọi phép đo bất kỳ đều tương tác với một hệ và làm cho nó biến đổi. Các thí nghiệm cơ-lượng tử cũng chứng tỏ rằng một kết quả đo được của một biến động lực phải là một trị riêng của một phép biến đổi tương ứng. Trạng thái của hệ sau khi đo, được cho bởivector riêng tương ứng với trị riêng đã đo được. Do đó mọi chuyên gia về chuyển động phải biết trị
Quyển IV, trang 159 riêng là gì.

** Nên nhớ rằng một đại số không kết hợp không có một biểu diễn bằng matrix.

Một *đại số* C∗ là một đại số Banach trên trường số phức với một phép đối hợp ∗ (một hàm là nghịch đảo của chính nó) sao cho chuẩn $\|x\|$ của phần tử x thoả hệ thức

$$\|x\|^2 = x^* \ x \ . \qquad (143)$$

(Một đại số Banach là một đại số định chuẩn đầy đủ; một đại số *đầy đủ* nếu tất cả các dãy Cauchy đều hội tụ). Tóm lại, *đại số* C∗ là một đại số thanh lịch có các phần tử tạo thành một tập hợp liên tục và một không gian vector phức. Tên C do từ 'hàm liên tục'. Thật vậy, các hàm liên tục *giới nội* tạo thành một đại số có chuẩn được xác định một cách thích hợp. Bạn có thể tìm ra nó không?

Câu đố 183 s

Mọi *đại số* C∗ (phát âm là 'Cee-star') đều chứa một không gian các phần tử Hermite (không gian có một phổ thực), một tập hợp các phần tử chuẩn, một nhóm có phép nhân của các phần tử đơn nguyên và một tập hợp các phần tử dương (với phổ không âm). Trong Thuyết lượng tử một hệ vật lý được mô tả bằng một *đại số* C∗ và các phần tử Hermite của nó là các biến động lực.

Ta sẽ để cập tới một loại đại số quan trọng được sử dụng trong toán học. Một *đại số chia* là một đại số mà đối với nó các phương trình $ax = b$ và $ya = b$ có lời giải x, y đơn trị, đối với mọi b và $a \neq 0$. Điều hiển nhiên là mọi loại số liên tục đều phải là các đại số chia. Đại số chia là một cách tổng quát hoá khái niệm số. Một trong những kết quả quan trọng của toán học hiện đại là các đại số chia (vô hạn chiều) *chỉ* có thể có 1 chiều như số thực, 2 chiều như số phức, 4 chiều như quaternion, hay 8 chiều như octonion. Như vậy không có cách nào để cho ta tổng quát hoá khái niệm 'số' (liên tục) với số chiều khác.

Bây giờ là một chút giải trí. Hãy tưởng tượng một vành chứa một trường số K làm một vành con (hay 'trường của các vô hướng'). Nếu phép nhân của vành được định nghĩa sao cho một phần tử tổng quát của vành nhân với một phần tử của K giống như một phép nhân vô hướng thì A là một không gian vector và như vậy là một đại số – *miễn là* mọi phần tử của K giao hoán với mọi phần tử của A. (Nói cách khác, vành con K phải là *trung tâm*.)

Thí dụ như quaternion $\mathbb{H}$ là đại số chia thực 4 chiều, nhưng mặc dù $\mathbb{H}$ là không gian vector phức 2 chiều nó vẫn *không phải là* một đại số phức vì i không giao hoán với j (ta có $ij = -ji = k$). Đúng ra không có đại số chia phức hữu hạn chiều và chỉ có các đại số chia kết hợp thực hữu hạn chiều là $\mathbb{R}$, $\mathbb{C}$ và $\mathbb{H}$.

Bây giờ nếu bạn không sợ nhức đầu hãy nghĩ về nhận xét này: mọi đại số-K cũng là một đại số trên trường của các vô hướng của nó. Vì lý do này, một số toán gia thích định nghĩa một đại số-K (kết hợp) một cách đơn giản là một vành chứa K làm một trường con trung tâm.

Trong Vật lý nó là các đại số liên hệ với các phép đối xứng có vai trò quan trọng nhất.

Đại số Lie

Đại số Lie là một loại đại số đặc biệt (tức là một không gian vector đặc biệt). Đây là loại đại số không kết hợp quan trọng nhất. Một không gian vector L trên trường $\mathbb{R}$ (hay $\mathbb{C}$) với một phép toán nhị nguyên bổ sung [,], là *phép nhân Lie* hay *giao hoán tử*, được gọi

là một *đại số Lie* thực (hay phức) nếu phép toán này thoả các hệ thức

$$[X,Y] = -[Y,X] \quad \textit{tính phản đối xứng}$$
$$[aX+bY,Z] = a[X,Z]+b[Y,Z] \quad \textit{tuyến tính (trái)}$$
$$[X,[Y,Z]]+[Y,[Z,X]]+[Z,[X,Y]] = 0 \quad \textit{đồng nhất thức Jacobi} \qquad (144)$$

đối với mọi phần tử $X, Y, Z \in L$ và đối với mọi $a, b \in \mathbb{R}$ (hay $\mathbb{C}$). (Đại số Lie được đặt tên theo Sophus Lie.) Hai điều kiện đầu tiên bao hàm ý song tuyến tính. Đại số Lie có tính *giao hoán* nếu $[X,Y] = 0$ đối với mọi phần tử X và Y. *Số chiều* của đại số Lie là số chiều của không gian vector. Một không gian con N của một đại số Lie L được gọi là một *ideal** nếu $[L,N] \subset N$; một ideal cũng là một *đại số con*. Một *ideal cực đại* M thoả điều kiện $[L,M] = 0$ được gọi là *tâm* của L.

Một đại số Lie được gọi là đại số Lie *tuyến tính* nếu các phần tử của nó là các phép biến đổi tuyến tính của các không gian vector V khác (một cách trực giác, nếu chúng là các 'matrix'). Hoá ra mọi đại số Lie hữu hạn chiều thì đẳng cấu với một đại số Lie tuyến tính. Do đó khi ta hình dung các phần tử của đại số Lie hữu hạn chiều là các matrix, thì cũng không mất đi tính tổng quát.

Tên 'đại số Lie' được ta chọn vì *các phần tử sinh*, tức là các phần tử vi phân của mọi
Trang 371
nhóm Lie, tạo thành một đại số Lie. Vì mọi phép đối xứng quan trọng trong thiên nhiên tạo thành các nhóm Lie, nên ta thường gặp đại số Lie trong Vật lý. Trong toán học, các đại số Lie thường phát sinh vì từ một đại số kết hợp hữu hạn chiều bất kỳ (trong đó ký hiệu $\cdot$ thay thế cho phép nhân) một đại số Lie sẽ xuất hiện khi ta định nghĩa *giao hoán tử* bằng hệ thức

$$[X,Y] = X\cdot Y - Y\cdot X\ . \qquad (145)$$

(Tên giao hoán tử là do hệ thức này). Nói chung, các đại số Lie thường không kết hợp nhưng định nghĩa giao hoán tử trên đây cho ta thấy cách xây dựng một đại số không kết hợp từ một đại số kết hợp.

Vì đại số Lie là không gian vector, các phần tử T_i của một *cơ bản* của đại số Lie luôn tuân theo hệ thức có dạng:

$$[T_i,T_j] = \sum_k c_{ij}^k T_k\ . \qquad (146)$$

Các số c_{ij}^k được gọi là *hằng số cấu trúc* của đại số Lie. Chúng phụ thuộc vào sự lựa chọn cơ bản. Các hằng số cấu trúc xác định đại số Lie một cách đầy đủ. Thí dụ như đại số của nhóm Lie SU(2), với 3 phần tử sinh được định nghĩa là $T_a = \sigma^a/2i$, trong đó σ^a là các matrix spin Pauli, có các hằng số cấu trúc là $C_{abc} = \varepsilon_{abc}$.**

Quyển IV, trang 232

* Bạn có thể giải thích ký hiệu $[L,N]$ không? Bạn có thể định nghĩa ideal cực đại là gì và chứng minh rằng chỉ có một ideal như vậy hay không?

** Giống như nhóm, đại số Lie có thể được biểu diễn bằng matrix, tức là các toán tử tuyến tính. Sự biểu diễn các đại số Lie rất quan trọng trong Vật lý vì nhiều nhóm đối xứng liên tục là các nhóm Lie.

Biểu diễn đối hợp của một đại số Lie với cơ bản $a_1 ... a_n$ là tập hợp các matrix $\mathrm{ad}(a)$ mà mỗi phần tử a được định nghĩa theo phương trình

$$[a,a_j] = \sum_c \mathrm{ad}(a)_{cj} a_c\ . \qquad (147)$$

Phân loại đại số Lie

Đại số Lie *hữu hạn chiều* được phân loại như sau. Mỗi đại số Lie hữu hạn chiều là tổng (bán trực tiếp) của một đại số Lie nửa đơn và một đại số Lie giải được.

Một đại số Lie được gọi là *giải được* nếu nó không nửa đơn. Đại số Lie giải được chưa được phân loại đầy đủ. Trong Vật lý chúng không quan trọng.

Một đại số Lie *nửa đơn* là một đại số Lie không có ideal giải được khác 0. Các định nghĩa tương đương khác, tuỳ vào khẩu vị của bạn là:

— một đại số Lie nửa đơn không chứa ideal Abel khác 0;
— dạng Killing của nó không kỳ dị, tức là không suy biến;
— nó tách thành tổng trực tiếp của các ideal không-Abel đơn (sự phân tích này là duy nhất);
— mọi biểu diễn tuyến tính hữu hạn chiều thì hoàn toàn khả quy;
— đối đồng điều 1 chiều của g với các giá trị trong một module-g hữu hạn chiều tuỳ ý thì tầm thường.

Các đại số Lie nửa đơn hữu hạn chiều đã được phân loại đầy đủ. Chúng được phân tích một cách duy nhất thành một tổng trực tiếp của các đại số Lie *đơn*. Các đại số Lie đơn có thể là phức hay thực.

Tất cả đại số Lie đơn *phức* hữu hạn chiều đều thuộc về 4 lớp vô hạn và 5 trường hợp ngoại lệ. Các lớp vô hạn còn được gọi là lớp *cổ điển*, đó là: A_n với $n \geqslant 1$, tương ứng với các nhóm Lie SL($n+1$) và 'người anh em' compact SU($n+1$) của chúng; B_n với $n \geqslant 1$, tương ứng với các nhóm Lie SO($2n+1$); C_n với $n \geqslant 1$, tương ứng với các nhóm Lie Sp($2n$); và D_n với $n \geqslant 4$, tương ứng với các nhóm Lie SO($2n$). Như vậy A_n là đại số của tất cả các matrix Hermite lệch; B_n và D_n là đại số của các matrix đối xứng; và C_n là đại số của các matrix không vết.

Các đại số Lie ngoại lệ là G_2, F_4, E_6, E_7, E_8. Trong tất cả các trường hợp, chỉ số là số *gốc* của đại số. Số chiều của các đại số này là A_n : $n(n+2)$; B_n và C_n : $n(2n+1)$; D_n : $n(2n-1)$; G_2 : 14; F_4 : 32; E_6 : 78; E_7 : 133; E_8 : 248.

Các đại số Lie đơn *thực* hữu hạn chiều, thì nhiều hơn; chúng được phân loại theo các đại số Lie phức. Ngoài ra, tương ứng với mỗi nhóm Lie phức, luôn luôn có một nhóm thực compact. Trong Vật lý cơ bản thì đại số Lie thực không quan trọng lắm. Xem 300

Trong các đại số Lie *hữu hạn chiều*, chỉ có 1 đại số quan trọng trong Vật lý là *đại số Poincaré*. Một ít đại số khác chỉ xuất hiện trong các nỗ lực không thành công để tìm ra

---

Định nghĩa này hàm ý rằng $\mathrm{ad}(a_i)_{jk} = c^k_{ij}$, trong đó c^k_{ij} là các hằng số cấu trúc của đại số Lie. Đối với đại số Lie thực, mọi phần tử của ad(a) là số thực với mọi $a \in L$.

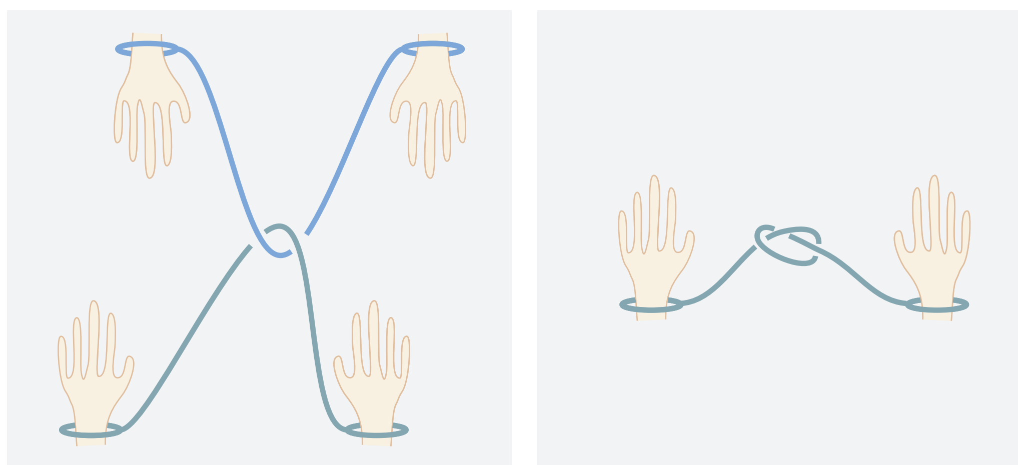
Cũng nên nhớ rằng đối với một đại số Lie bất kỳ, ta có thể định nghĩa tích vô hướng bằng cách đặt

$$X \cdot Y = \mathrm{Tr}(\,\mathrm{ad}X \cdot \mathrm{ad}Y\,)\,. \tag{148}$$

Tích vô hướng này có tính đối xứng và song tuyến tính. (Bạn có thể chứng tỏ rằng nó độc lập với sự biểu diễn không?) Dạng song tuyến tính tương ứng còn được gọi là *dạng Killing*, theo tên toán gia Wilhelm Killing (b. 1847 Burbach, d. 1923 Münster), người khám phá các nhóm Lie 'ngoại lệ'. Dạng Killing bất biến dưới tác dụng của một phép đẳng cấu bất kỳ của đại số Lie L. Trong cơ bản đã cho, ta có

$$X \cdot Y = \mathrm{Tr}(\,(\mathrm{ad}X)\cdot(\mathrm{ad}Y)) = c^i_{lk} c^k_{si} x^l y^s = g_{ls} x^l y^s \tag{149}$$

trong đó $g_{ls} = c^i_{lk} c^k_{si}$ được gọi là *tensor metric Cartan* của L.



HÌNH 183 Trường hợp nào ta có thể tách rời hay mở gút mà không cần cắt dây?

lý thuyết thống nhất.

Topo học – Có những loại hình dạng nào?

> Topo học là lý thuyết nhóm.
> Chương trình Erlangen

Theo quan điểm của topo đã đơn giản hoá nhưng đủ cho các nhà vật lý thì chỉ có một loại thực thể có hình dạng: đa tạp. *Đa tạp* là thí dụ được tổng quát hoá của áo thun: chúng có tính phẳng địa phương, có thể có lỗ và biên, thường lộn trái được.

Câu đố 184 s Áo thun là một thực thể huyền ảo. Thí dụ như bạn có thể lộn trái áo thun trong khi hai tay bị cột với nhau không? (Bạn có thể nhờ một người bạn.) Ngoài ra, bạn cũng có thể biểu diễn với quần dài trong khi hai chân bị cột với nhau. Nhiều giáo sư thích chứng minh điều này trong các bài giảng về topo – dĩ nhiên với đồ lót đã được tuyển chọn cẩn thận.

Xem 301 Câu đố 185 s Một câu đố hay về topo khác là câu đố xích tay như trong Hình 183. Trường hợp nào ta có thể tách rời hay mở gút mà không cần cắt dây?

Đối với các toán gia, áo thun và dây thừng là các thí dụ thông thường của đa tạp và các phép toán thực hiện trên các vật đó là các thí dụ về sự biến dạng. Ta hãy xem một số định nghĩa chính xác hơn. Để định nghĩa đa tạp là gì, ta cần định nghĩa không gian topo trước.

Không gian topo

> Ở Úc, một con ruồi bước trên trần nhà có cùng hướng với một con bò và chúng ta.
> Philippe Geluck, *La marque du chat*.

Xem 302 Việc nghiên cứu hình dạng đòi hỏi một định nghĩa hợp lý của tập hợp 'điểm'. Để có thể nói về hình dạng, các tập hợp này phải được xây dựng sao cho chúng có thể kết nạp một khái niệm hữu ích là 'sự lân cận' hay 'sự kề cận' giữa các phần tử trong tập hợp. Việc tìm

kiếm một loại tập hợp tổng quát nhất chấp nhận một định nghĩa hữu ích của sự lân cận đã dẫn tới khái niệm không gian topo. Có 2 cách định nghĩa topo: ta có thể định nghĩa khái niệm *tập hợp mở* rồi định nghĩa khái niệm *lân cận* hay đi theo một con đường khác. Ta chọn cách thứ hai, mang tính trực giác hơn.

Không gian topo là một tập hữu hạn hay vô hạn X các phần tử được gọi là *điểm* cùng với các lân cận của mỗi điểm. *Lân cận* N của một điểm x là một tập các tập hợp con Y_x của X có các tính chất

— x thuộc về mỗi Y_x;
— nếu N và M là lân cận của x, thì $N \cap M$ cũng vậy;
— tập hợp bất kỳ chứa một lân cận của x thì nó cũng là một lân cận của x.

Việc chọn các tập hợp con Y_x thì tự do. Tập hợp con Y_x đối với mọi điểm x, được chọn theo một cách đặc biệt, chứa một lân cận đối với mỗi điểm của chúng được gọi là *tập hợp mở*. (Một lân cận và một tập hợp mở thường khác nhau nhưng mọi tập hợp mở đều là các lân cận. Lân cận của x cũng có thể được mô tả là các tập hợp con của X chứa một tập hợp mở chứa x.)

Ta cũng có thể gọi không gian topo là 'tập hợp với một topo'. Trên thực tế, một *topo* xác định các hệ 'lân cận' của mọi điểm trong tập hợp. 'Topo' cũng là tên một phân nhánh của toán học nghiên cứu các không gian topo.

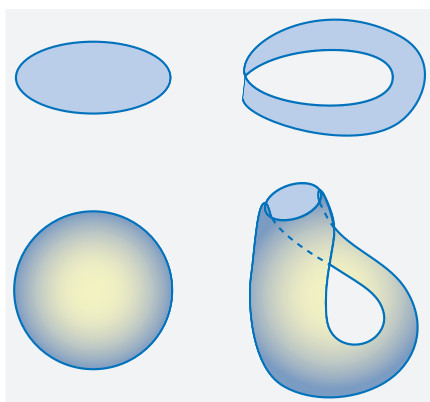
Thí dụ như số thực cùng với mọi khoảng mở tạo thành topo *thông thường* của $\mathbb{R}$. Các toán gia đã tổng quát hoá phương thức này. Nếu ta lấy *mọi* tập hợp con của $\mathbb{R}$ – hay một tập hợp cơ bản bất kỳ khác – làm các tập hợp mở thì đó là topo *rời rạc*. Nếu ta *chỉ* lấy các tập hợp cơ bản và tập hợp trống làm các tập hợp mở thì đó là topo *tầm thường* hay *không rời rạc*.

Khái niệm không gian topo cho phép ta định nghĩa sự liên tục. Một ánh xạ từ một không gian topo X tới không gian topo Y thì *liên tục* nếu ảnh ngược của mọi tập hợp mở trong Y là một tập mở trong X. Bạn có thể kiểm chứng rằng điều kiện này không thoả đối với một hàm thực có bước nhảy. Bạn cũng có thể kiểm tra là cần có thuật ngữ 'ngược' trong định nghĩa; nếu khác đi thì hàm thực có bước nhảy sẽ liên tục, vì một hàm như vậy vẫn có thể ánh xạ tập hợp mở thành tập hợp mở.* Câu đố 186 ny

Như vậy ta cần khái niệm không gian topo hay lân cận nếu ta muốn diễn tả ý tưởng không có bước nhảy trong thiên nhiên. Ta cũng cần khái niệm không gian topo để có thể định nghĩa giới hạn.

Trong các loại không gian topo đã được nghiên cứu có một loại đặc biệt quan trọng. Một *không gian Hausdorff* là một không gian topo mà đối với 2 điểm bất kỳ x và y ta có các tập hợp mở U và V rời nhau sao cho x thuộc U và y thuộc V. Không gian Hausdorff là một không gian mà bất kể 2 điểm 'gần nhau' như thế nào đi nữa thì chúng vẫn có thể bị các tập hợp mở tách rời. Điều này hình như là một tính chất đáng ao ước; thật vậy, các không gian không-Hausdorff là các vật thể toán học khá phức tạp. (Ở mức năng lượng Planck, hình như chân không có tính chất giống như không gian không-Hausdorff; tuy vậy, ở mức năng lượng Planck, chân không không phải là một không gian thực sự. Vì vậy

* Định nghĩa liên tục của Cauchy–Weierstass phát biểu rằng một hàm thực $f(x)$ liên tục tại điểm a nếu (1) f xác định trên khoảng mở chứa a, (2) $f(x)$ dẫn tới một giới hạn khi x dẫn tới a, và (3) giới hạn là $f(a)$. Trong định nghĩa này, tính liên tục của f được xác định bằng cách sử dụng ý tưởng trực giác là số thực tạo nên mô hình cơ bản của một tập hợp không có khoảng hở. Bạn có thể thấy mối liên hệ với định nghĩa tổng quát ở trên không?



HÌNH 184 Các thí dụ về đa tạp có thể định hướng và không thể định hướng trong không gian 2 chiều: đĩa, dải Möbius, hình cầu và chai Klein.

không gian không-Hausdorff không có vai trò quan trọng trong Vật lý). Có một trường hợp không gian Hausdorff đặc biệt nổi tiếng: đa tạp.

Đa tạp

Trong Vật lý, không gian topo quan trọng nhất là đa tạp vi phân. Nói một cách không chặt chẽ thì một *đa tạp vi phân* – vật lý gia chỉ gọi đơn giản là *đa tạp* – là một tập hợp các điểm trông giống như $\mathbb{R}^n$ dưới kính hiển vi – ở khoảng cách gần. Thí dụ như một hình cầu và một hình xuyến đều là các đa tạp vi phân 2 chiều vì nhìn chúng trong phạm vi nhỏ thì giống như mặt phẳng. Không phải mọi đa tạp vi phân đều đơn giản vì các thí dụ trong Hình 184 cho ta thấy điều này.

Một đa tạp vi phân được gọi là *liên thông* nếu 2 điểm bất kỳ có thể nối với nhau bằng một đường nằm trong đa tạp. (Thuật ngữ này có một nghĩa tổng quát hơn trong không gian topo. Nhưng các khái niệm liên thông và liên thông theo đường thì trùng nhau đối với đa tạp vi phân). Ta tập trung vào đa tạp liên thông trong phần bàn luận sau đây. Một đa tạp được gọi là *đơn liên thông* nếu mọi vòng nằm trong đa tạp đều có thể co lại thành một điểm. Một hình cầu có tính đơn liên thông. Một đa tạp liên thông nhưng không đơn liên thông được gọi là *đa liên thông*. Hình xuyến có tính đa liên thông.

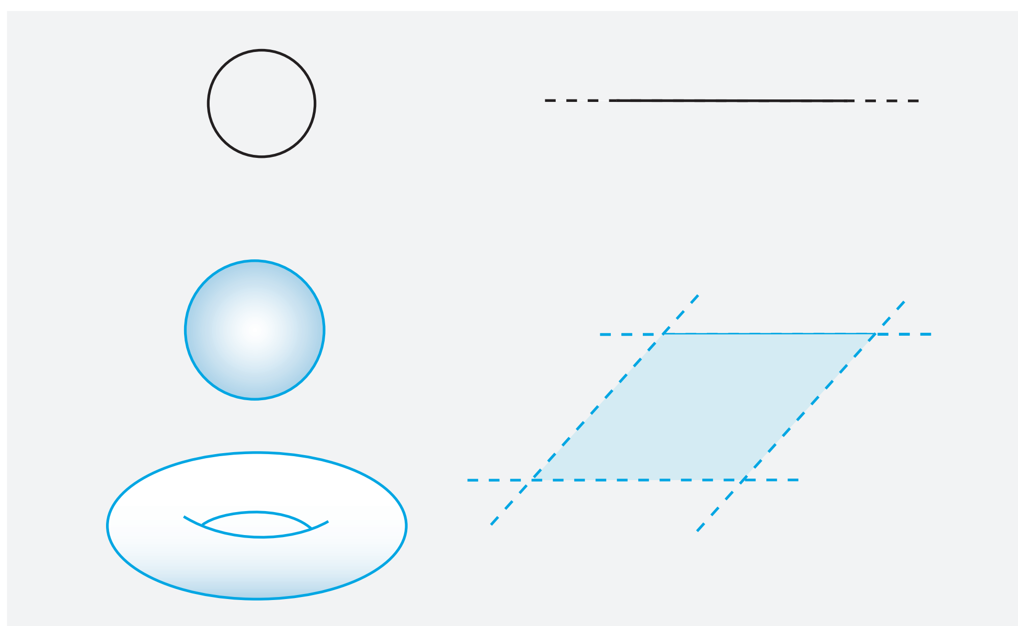
Đa tạp có thể có tính chất *không thể định hướng*, như dải Möbius nổi tiếng đã cho ta thấy. Đa tạp không thể định hướng chỉ có 1 mặt: chúng không cho ta khả năng phân biệt mặt trước và mặt sau. Nếu bạn muốn giải trí, hãy cắt đôi một dải Möbius dọc theo đường trung tâm. Bạn có thể thử với các dải bằng giấy, với các kiểu xoắn khác nhau, để thấy thêm các điều kỳ dị khác.

Câu đố 187 e

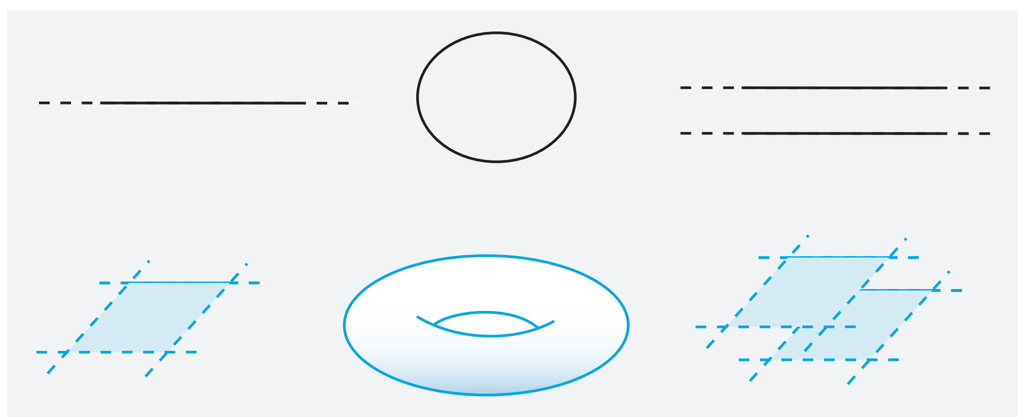
Với 2 chiều, đa tạp đóng (hay mặt), tức là các mặt compact và không có biên, thì luôn luôn thuộc 1 trong 3 loại:

— Loại đơn giản nhất là hình cầu có gắn n tay cầm; chúng được gọi là *n-tori* hay *mặt có giống n*. Chúng là các mặt định hướng được với *đặc số Euler* là $2 - 2n$.
— *Mặt phẳng xạ ảnh* có gắn n tay cầm là các mặt không thể định hướng với đặc số Euler là $1 - 2n$.
— Chai Klein có gắn n tay cầm là các mặt không thể định hướng với đặc số Euler là $-2n$.

Do đó đặc số Euler và 'tính định hướng được' có thể mô tả các mặt compact cho tới



HÌNH 185 Đa tạp compact (bên trái) và không-compact (bên phải) với số chiều khác nhau.

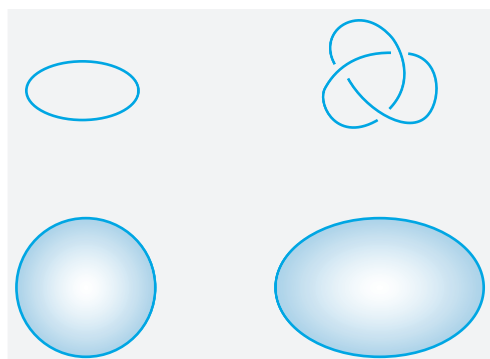


HÌNH 186 Đa tạp đơn liên thông (hình bên trái), đa liên thông (hình ở giữa) và không liên thông (hình bên phải) có 1 chiều (hình trên) và 2 chiều (hình bên dưới).

Trang 368 phép đồng phôi (và nếu các mặt trơn, thì lên tới phép vi đồng phôi). Phép đồng phôi sẽ được định nghĩa dưới đây.

Ta có thể tìm được các đa tạp compact 2 chiều hay các mặt có biên bằng cách lấy đi 1 hay nhiều đĩa của một mặt trong danh sách này. Một mặt compact có thể nhúng trong $\mathbb{R}^3$ nếu nó định hướng được hay nếu nó có biên.

Trong vật lý, đa tạp quan trọng nhất là không-thời gian và nhóm Lie của các biến động lực. Ta sẽ nghiên cứu các nhóm Lie dưới đây. Có một điều kỳ lạ là người ta không biết topo của không-thời gian. Thí dụ như ta không biết là nó có tính đơn liên thông hay không. Điều đó hiển nhiên vì ta không thể quan sát mọi điều xảy ra ở các khoảng cách



HÌNH 187 Thí dụ về các cặp đa tạp đồng phôi.



HÌNH 188 Bốn loại đa tạp liên thông compact 2 chiều định hướng được đầu tiên: 0-, 1-, 2- và 3-tori.

xa Trái đất. Một khó khăn tương tự cũng xuất hiện khi ta đến gần kích cỡ Planck.

Nếu 1 đa tạp làm bằng cao su, tính liên thông và các tính chất toàn cục tương tự không bị thay đổi khi đa tạp bị biến dạng. Điều này được hình thức hoá bằng cách nói rằng 2 đa tạp *đồng phôi* (từ tiếng Hy Lạp nghĩa là 'giống nhau' và 'hình dạng') nếu giữa chúng có một ánh xạ liên tục, 1-1 trên, cùng với một ánh xạ ngược liên tục. Khái niệm đồng phôi tổng quát hơn khái niệm biến dạng của cao su như ta có thể thấy trong Hình 187. Nếu ánh xạ và đa tạp khả vi thì người ta nói rằng 2 đa tạp này *vi đồng phôi*.

Lỗ thủng, đồng luân và đồng điều

Chỉ có các đa tạp 'hoạt động tốt' mới đóng vai trò quan trọng trong Vật lý: cụ thể là các đa tạp liên thông và định hướng được. Ngoài ra, các đa tạp liên kết với các biến động lực thì luôn luôn compact. Đặc trưng chính không tầm thường của các đa tạp compact liên thông định hướng được là chúng chứa 'các lỗ thủng' (xem Hình 188). Hoá ra việc mô tả đúng các lỗ thủng của đa tạp cho phép ta phân biệt các loại đa tạp khác nhau (tức là không đồng phôi).

Có 3 công cụ chính để mô tả lỗ thủng của đa tạp và mối liên hệ giữa chúng: đồng luân, đồng điều và đối đồng điều. Các công cụ này rất quan trọng trong việc nghiên cứu các nhóm chuẩn vì một nhóm chuẩn bất kỳ đều xác định một đa tạp.

Nói cách khác, thông qua lý thuyết đồng luân và đồng điều các toán gia có thể *phân loại* các đa tạp. Với 2 đa tạp đã cho, các tính chất của lỗ thủng trong đa tạp sẽ xác định rằng chúng có biến dạng thành đa tạp kia hay không.

Các vật lý gia đang mở rộng các kết quả này của topo tiêu chuẩn. Sự biến dạng là một ý tưởng cổ điển đã giả sử rằng không gian và thời gian liên tục cũng như tác dụng có thể nhỏ tuỳ ý. Tuy vậy trong thiên nhiên thì tác dụng lượng tử không thể bỏ qua. Người ta cho rằng các hiệu ứng lượng tử có thể biến đổi một đa tạp vật lý thành một đa tạp có topo *khác*: thí dụ như hình xuyến thành hình cầu. Bạn có thể tìm ra cách đạt được điều này không?

Câu đố 188 d

Sự thay đổi topo của các đa tạp vật lý xảy ra thông qua các đối tượng là sự tổng quát hoá của các đa tạp. *Orbifold* là một không gian được mô hình theo địa phương, bởi thương của $\mathbb{R}^n$ với một nhóm hữu hạn. Các thí dụ là giọt-lệ hay nửa-mặt phẳng. Orbifold được Satake Ichiro đưa ra năm 1956; tên do William Thurston đặt ra. Orbifold được nghiên cứu rất nhiều trong lý thuyết dây.

Loại và sự phân loại nhóm

Quyển I, trang 272 Trên kia ta đã giới thiệu các *nhóm* toán họcvì nhóm, đặc biệt là các nhóm đối xứng, có vai trò quan trọng trong nhiều lĩnh vực Vật lý, từ việc mô tả chất rắn, phân tử, nguyên tử, hạt nhân, hạt sơ cấp và lực cho tới việc nghiên cứu các hình dạng, chu trình và các kiểu thức trong các quá trình tăng trưởng.

Lý thuyết nhóm cũng là một trong các phân nhánh quan trọng nhất của Toán học hiện đại và vẫn còn là một lĩnh vực nghiên cứu sôi nổi. Một trong các mục tiêu của Lý thuyết nhóm là *sự phân loại* tất cả các nhóm. Người ta chỉ hoàn tất công việc này đối với một vài loại đặc biệt. Nhìn chung, ta phân biệt 2 loại nhóm hữu hạn và vô hạn. Nhóm hữu hạn được tìm hiểu nhiều hơn.

Mỗi nhóm *hữu hạn* đều đẳng cấu với một nhóm con của nhóm đối xứng S_N, đối với một số số N. Thí dụ như nhóm tinh thể được sử dụng để phân loại cấu trúc tinh thể hay các nhóm dùng để phân loại các kiểu thức của giấy dán tường theo tính đối xứng của chúng. Các nhóm đối xứng Platon và nhóm đối xứng của các chất rắn thông thường khác cũng là các nhóm hữu hạn.

Các nhóm đối xứng hữu hạn là một họ phức. Nói một cách đại khái thì nhóm (hữu hạn) tổng quát có thể xem như được tạo nên từ một số viên gạch cơ bản, cũng là các nhóm. Các viên gạch cơ bản này được gọi là các nhóm *đơn* (hữu hạn). Một trong những đỉnh cao của toán học thế kỷ 20 là sự phân loại các nhóm đơn hữu hạn. Nó là nỗ lực tập thể diễn ra trong 30 năm, khoảng từ 1950 tới 1980. Danh sách đầy đủ của các nhóm hữu Xem 303 hạn bao gồm

1) *các nhóm cyclic* Z_p có bậc của nhóm nguyên;

2) *các nhóm giao phiên* A_n có bậc n ít nhất là 5;

3) *các nhóm tuyến tính cổ điển*, $PSL(n;q)$, $PSU(n;q)$, $PSp(2n;q)$ và $P\Omega^{\varepsilon}(n;q)$;

4) các nhóm *ngoại lệ* hay *nhóm xoắn* kiểu Lie ${}^3D_4(q)$, $E_6(q)$, ${}^2E_6(q)$, $E_7(q)$, $E_8(q)$, $F_4(q)$, ${}^2F_4(2^n)$, $G_2(q)$, ${}^2G_2(3^n)$ và ${}^2B_2(2^n)$;

5) 26 *nhóm rải rác/sporadic*, cụ thể là M_{11}, M_{12}, M_{22}, M_{23}, M_{24} (nhóm Mathieu), J_1, J_2, J_3, J_4 (nhóm Janko), Co_1, Co_2, Co_3 (nhóm Conway), HS, Mc, Suz (Co_1 'babies'), Fi_{22}, Fi_{23}, Fi'_{24} (nhóm Fischer), $F_1 = M$ (Monster), F_2, F_3, F_5, He (= F_7) (Monster 'babies'), Ru, Ly, và ON.

Việc phân loại kết thúc trong thập niên 1980 sau hơn 10 000 trang công trình. Các chứng minh nhiều đến nỗi hàng loạt sách đặc biệt ra đời để tóm tắt và giải thích chúng. Ba họ đầu tiên là vô hạn. Họ cuối cùng thuộc nhóm sporadic thì kỳ dị nhất; nó bao gồm các nhóm đơn hữu hạn không phù hợp với các họ khác. Một số trong nhóm sporadic này có thể ứng dụng trong Vật lý hạt: nhóm lớn nhất trong số đó được gọi là nhóm *Monster*. Đây vẫn còn là đề tài nghiên cứu. (Nhóm Monster có khoảng $8.1 \cdot 10^{53}$ phần tử; chính xác hơn, bậc của nó là 808 017 424 794 512 875 886 459 904 961 710 757 005 754 368 000 000 000 hay $2^{46} \cdot 3^{20} \cdot 5^9 \cdot 7^6 \cdot 11^2 \cdot 13^3 \cdot 17 \cdot 19 \cdot 23 \cdot 29 \cdot 31 \cdot 41 \cdot 47 \cdot 59 \cdot 71$.)

Trong các nhóm *hữu hạn*, người ta chỉ nghiên cứu một số nhóm có điều kiện cho sự hữu hạn. Đó là các nhóm được ta quan tâm trong việc mô tả thiên nhiên. Các nhóm vô hạn được chia thành nhóm *rời rạc* và nhóm *liên tục*. Nhóm rời rạc là một lĩnh vực toán học được nghiên cứu sôi nổi, có liên hệ với lý thuyết số và topo. Các nhóm liên tục được chia thành nhóm *sinh hữu hạn* và nhóm *sinh vô hạn*. Nhóm sinh hữu hạn có thể có hữu hạn chiều hay vô hạn chiều.

Lớp các nhóm sinh hữu hạn liên tục quan trọng nhất là nhóm Lie.

Nhóm Lie

Trong thiên nhiên, Lagrangian của các lực cơ bản bất biến qua các phép biến đổi chuẩn và các phép biến đổi không-thời gian liên tục. Các nhóm đối xứng này là thí dụ về nhóm Lie, là một loại nhóm liên tục vô hạn đặc biệt. Chúng được đặt tên theo toán gia vĩ đại Sophus Lie (b. 1842 Nordfjordeid, d. 1899 Kristiania). Tên của ông được phát âm giống như từ 'Lee'.

Nhóm Lie (thực) là một nhóm đối xứng vô hạn, tức là một nhóm có vô hạn phần tử, và cũng là một đa tạp giải tích. Nói một cách đại khái thì điều này có nghĩa là các phần tử của nhóm có thể xem như các điểm trên một mặt (siêu diện) trơn mà hình dạng có thể được mô tả bằng một hàm giải tích, tức là một hàm trơn đến nỗi ta có thể biểu diễn nó thành một chuỗi luỹ thừa trong vùng lân cận của mọi điểm của nhóm nơi chúng được xác định. Các điểm của nhóm Lie được nhân theo phép nhân của nhóm. Ngoài ra, toạ độ của tích phải là hàm giải tích của toạ độ của các thừa số, và toạ độ ảnh của một phần tử phải là hàm giải tích của toạ độ của phần tử đó. Đúng ra định nghĩa này quá chặt chẽ: người ta có thể chứng minh rằng một nhóm Lie chỉ là một nhóm topo có không gian cơ bản là một đa tạp Euclide địa phương hữu hạn chiều.

Nhóm Lie phức là một nhóm có đa tạp phức và các phép tính trên nhóm là các hàm toàn hình (thay vì giải tích) của các toạ độ.

Tóm lại, một nhóm Lie là một đa tạp hoạt động tốt trong đó các điểm có thể nhân với nhau. Thí dụ như vòng tròn $\boldsymbol{T} = \{z \in \mathbb{C} : |z| = 1\}$, với phép nhân phức thông thường là một nhóm Lie thực. Nó là nhóm Abel. Nhóm này còn được gọi là S^1, vì nó là hình cầu 1 chiều hay U(1), có nghĩa là 'nhóm đơn nguyên 1 chiều'. Các nhóm Lie 1 chiều khác là nhóm nhân của các số thực khác 0 và các nhóm con của nó; nhóm nhân của các số thực dương.

Cho đến nay, trong Vật lý chỉ có nhóm Lie *tuyến tính* là có vai trò quan trọng – đó là các nhóm Lie tác dụng như các phép biến đổi tuyến tính trên một số không gian vector. (Phủ của SL(2,$\mathbb{R}$) hay hình xuyến compact phức là thí dụ về nhóm Lie không tuyến tính). Các nhóm Lie tuyến tính quan trọng trong Vật lý là các nhóm con Lie của nhóm tuyến tính tổng quát GL(N,K), trong đó K là một trường số. Nhóm này được định nghĩa như một tập hợp tất cả các matrix N×N không kỳ dị, tức là khả nghịch đảo, thực, phức hay quaternion. Mọi nhóm Lie được bàn luận dưới đây đều thuộc loại này.

Mọi matrix *thực* khả nghịch đảo A đều có thể được viết một cách duy nhất dưới dạng một matrix đơn nguyên U và một matrix Hermite H:

$$A = U\mathrm{e}^H \, . \qquad (150)$$

Câu đố 189 s $(H = \frac{1}{2} \ln A^\dagger A$, và $U = A\mathrm{e}^{-H}$.)

Các nhóm Lie đơn U(1), SO(2,ℝ), các nhóm Lie dựa trên các số thực và phức là các nhóm Abel (xem Bảng 37); các nhóm khác đều không phải là nhóm Abel.

Các nhóm Lie là các đa tạp. Do đó trong một nhóm Lie, người ta có thể định nghĩa khoảng cách giữa 2 điểm, mặt phẳng tiếp xúc (hay không gian tiếp xúc) tại 1 điểm và các khái niệm vi/tích phân. Vì nhóm Lie là đa tạp nên có cùng loại cấu trúc như các vật trong các hình 184, 185 và 186. Nhóm Lie có thể có số chiều bất kỳ. Giống như các đa tạp khác, cấu trúc toàn cục của chúng có chứa những thông tin quan trọng; ta hãy tìm hiểu điều này.

Tính liên thông

Ta có thể dễ dàng thấy rằng các nhóm Lie SU(N) là đơn liên thông đối với mọi $N = 2, 3 \ldots$; chúng có topo của một hình cầu 2N chiều. Nhóm Lie U(1), có topo của hình cầu 1 chiều hay vòng tròn, thì đa liên thông.

Các nhóm Lie SO(N) thì *không* đơn liên thông đối với $N = 2, 3 \ldots$ bất kỳ. Nhìn chung, SO(N,K) và GL(N,ℂ) có tính liên thông. Mọi nhóm Lie SL(N,K) có tính liên thông; SL(N,ℂ) thì đơn liên thông. Các nhóm Lie Sp(N,K) thì liên thông; Sp(2N,ℂ) thì đơn liên thông. Một cách tổng quát, mọi nhóm Lie nửa-đơn thì liên thông.

Các nhóm Lie O(N,K), SO(N,M,K) và GL(N,ℝ) không có tính liên thông; chúng chứa 2 thành phần liên thông.

Nên nhớ rằng nhóm Lorentz không liên thông: nó gồm 4 mảnh tách rời. Giống như nhóm Poincaré, nó không compact và 4 mảnh của nó cũng vậy. Nói rộng ra, tính không-compact của nhóm đối xứng không-thời gian là một hệ quả của tính không-compact của không-thời gian.

Tính Compact

Một nhóm Lie có tính *compact* nếu nó đóng và bị giới nội khi được xem như một đa tạp. Đối với sự tham số hoá đã cho của các phần tử của nhóm, nhóm Lie có tính compact nếu tất cả các khoảng tham số đều là các khoảng đóng và hữu hạn. Nếu khác đi thì nhóm được gọi là *không-compact*. Cả 2 loại nhóm compact và không-compact đều được sử dụng trong Vật lý. Việc phân biệt giữa 2 loại khá quan trọng vì ta có thể biểu diễn các nhóm compact theo một phương thức đơn giản giống như các nhóm hữu hạn, trong khi đối với các nhóm không-compact ta phải dùng phương pháp khác. Kết quả là các biến động lực vật lý, luôn luôn thuộc về một biểu diễn của một nhóm đối xứng, có các tính chất khác nhau trong 2 trường hợp: nếu nhóm đối xứng compact, các biến động lực có phổ *rời rạc* còn ngược lại thì không.

Mọi nhóm của các phép nội biến đổi chuẩn, như U(1) và SU(n), tạo nên các nhóm compact. Đúng ra Lý thuyết trường *đòi hỏi* các phép biến đổi chuẩn là các nhóm Lie compact. Chỉ có các nhóm Lie compact là nhóm hình xuyến T^n, O(n), U(n), SO(n) và SU(n), phủ kép của chúng là Spin(n) và Sp(n). Trái lại, SL(n,ℝ), GL(n,ℝ), GL(n,ℂ) và mọi nhóm khác đều không compact.

Ngoài việc là đa tạp, các nhóm Lie hiển nhiên là các nhóm. Hoá ra phần lớn các tính chất nhóm của chúng chỉ được bộc lộ nhờ hành trạng của các phần tử rất gần với phần tử đơn vị (như các điểm trên đa tạp).

Mọi phần tử của một nhóm Lie compact và liên thông đều có dạng $\exp(A)$ đối với một số phần tử A. Những phần tử A sinh ra theo cách này tạo thành một đại số gọi là

đại số Lie tương ứng. Đối với một nhóm Lie tuyến tính bất kỳ, mọi phần tử của nhóm con liên thông đều có thể được biểu diễn thành một tích hữu hạn của luỹ thừa của các phần tử của đại số Lie tương ứng. Về mặt toán học, không gian vector do đại số Lie xác định tiếp xúc với đa tạp do nhóm đó xác định, tại vị trí của phần tử đơn vị. Tóm lại, đại số Lie biểu diễn tính chất địa phương của các nhóm Lie gần phép biến đổi đồng nhất. Đó là lý do tại sao chúng lại quan trọng trong Vật lý.

Trang 361

BẢNG 37 Tính chất của các nhóm Lie thực và phức quan trọng nhất.

Nhóm Lie	Mô tả	Tính chất[a]	Đại số Lie	Mô tả của đại số Lie	Số chiều
1. Các nhóm thực					thực
$\mathbb{R}^n$	Không gian Euclide với phép cộng	Abel, đơn liên thông, không compact; $\pi_0 = \pi_1 = 0$	$\mathbb{R}^n$	Abel, dấu móc Lie bằng 0; không đơn	n
$\mathbb{R}^\times$	số thực khác 0 với phép nhân	Abel, không liên thông, không compact; $\pi_0 = \mathbb{Z}_2$, không có π_1	$\mathbb{R}$	Abel, dấu móc Lie bằng 0	1
$\mathbb{R}^{>0}$	số thực dương với phép nhân	Abel, đơn liên thông, không compact; $\pi_0 = \pi_1 = 0$	$\mathbb{R}$	Abel, dấu móc Lie bằng 0	1
$S^1 = \mathbb{R}/\mathbb{Z} = U(1) = T = SO(2) = Spin(2)$	số phức có giá trị tuyệt đối bằng 1, với phép nhân	Abel, liên thông, không đơn liên thông, compact; $\pi_0 = 0$, $\pi_1 = \mathbb{Z}$	$\mathbb{R}$	Abel, dấu móc Lie bằng 0	1
$\mathbb{H}^\times$	quaternion khác 0 với phép nhân	đơn liên thông, không compact; $\pi_0 = \pi_1 = 0$	$\mathbb{H}$	quaternion, có dấu móc Lie là giao hoán tử	4
S^3	quaternion có giá trị tuyệt đối bằng 1, với phép nhân, cũng có tên Sp(1); hình cầu 3 chiều topo	đơn liên thông, compact; đẳng cấu với SU(2), Spin(3) và phủ kép của SO(3); $\pi_0 = \pi_1 = 0$	Im($\mathbb{H}$)	quaternion có phần thực bằng 0, có dấu móc Lie là giao hoán tử; đơn và nửa-đơn; đẳng cấu với vector 3 chiều thực, có dấu móc Lie là tích vector; cũng đẳng cấu với su(2) và so(3)	3
GL(n, $\mathbb{R}$)	nhóm tuyến tính tổng quát: matrix n x n thực khả nghịch đảo	không liên thông, không compact; $\pi_0 = \mathbb{Z}_2$, không có π_1	M(n, $\mathbb{R}$)	matrix n x n, có dấu móc Lie là giao hoán tử	n^2

BẢNG 37 (Tiếp theo) Tính chất của các nhóm Lie thực và phức quan trọng nhất.

Nhóm Lie	Mô tả	Tính chất[a]	Đại số Lie	Mô tả của đại số Lie	Số chiều
$GL^+(n, \mathbb{R})$	matrix n x n thực có định thức dương	đơn liên thông, không compact; $\pi_0 = 0$, đối với $n = 2$: $\pi_1 = \mathbb{Z}$, đối với $n \geq 2$: $\pi_1 = \mathbb{Z}_2$; $GL^+(1, \mathbb{R})$ đẳng cấu với $\mathbb{R}^{>0}$	$M(n, \mathbb{R})$	matrix n x n, có dấu móc Lie là giao hoán tử	n^2
$SL(n, \mathbb{R})$	nhóm tuyến tính đặc biệt: matrix thực có định thức bằng 1	đơn liên thông, không compact nếu $n > 1$; $\pi_0 = 0$, đối với $n = 2$: $\pi_1 = \mathbb{Z}$, đối với $n \geq 2$: $\pi_1 = \mathbb{Z}_2$; $SL(1, \mathbb{R})$ là một điểm đơn, $SL(2, \mathbb{R})$ đẳng cấu với $SU(1, 1)$ và $Sp(2, \mathbb{R})$	$sl(n, \mathbb{R}) = A_{n-1}$	matrix n x n có vết bằng 0, có dấu móc Lie là giao hoán tử	$n^2 - 1$
$O(n, \mathbb{R}) = O(n)$	nhóm trực giao: matrix trực giao thực; nhóm đối xứng của siêu cầu	không liên thông, compact; $\pi_0 = \mathbb{Z}_2$, không có π_1	$so(n, \mathbb{R})$	matrix n-by-n thực đối xứng lệch, có dấu móc Lie là giao hoán tử ; $so(3, \mathbb{R})$ đẳng cấu với $su(2)$ và $\mathbb{R}^3$ với tích vector	$n(n-1)/2$
$SO(n, \mathbb{R}) = SO(n)$	nhóm trực giao đặc biệt: matrix trực giao thực có định thức bằng 1	liên thông, compact; đối với $n \geqslant 2$ không đơn liên thông; $\pi_0 = 0$, đối với $n = 2$: $\pi_1 = \mathbb{Z}$, đối với $n \geq 2$: $\pi_1 = \mathbb{Z}_2$	$so(n, \mathbb{R}) = B_{\frac{n-1}{2}}$ hay $D_{\frac{n}{2}}$	matrix n x n thực đối xứng lệch, có dấu móc Lie là giao hoán tử ; đối với $n = 3$ và $n \geqslant 5$ đơn và nửa đơn; $SO(4)$ là nửa đơn nhưng không đơn	$n(n-1)/2$
$Spin(n)$	nhóm spin; phủ kép của $SO(n)$; $Spin(1)$ đẳng cấu với $\mathbb{Q}_2$, $Spin(2)$ đẳng cấu với S^1	đơn liên thông đối với $n \geqslant 3$, compact; đối với $n = 3$ và $n \geqslant 5$ đơn và nửa đơn; đối với $n > 1$: $\pi_0 = 0$, đối với $n > 2$: $\pi_1 = 0$	$so(n, \mathbb{R})$	matrix n x n thực đối xứng lệch, có dấu móc Lie là giao hoán tử	$n(n-1)/2$
$Sp(2n, \mathbb{R})$	nhóm ngẫu đối: matrix ngẫu đối thực	không compact; $\pi_0 = 0$, $\pi_1 = \mathbb{Z}$	$sp(2n, \mathbb{R}) = C_n$	matrix thực A thoả $JA + A^T J = 0$ trong đó J là matrix đối xứng lệch tiêu chuẩn;[b] đơn và nửa đơn	$n(2n+1)$

Bảng 37 (Tiếp theo) Tính chất của các nhóm Lie thực và phức quan trọng nhất.

Nhóm Lie	Mô tả	Tính chất[a]	Đại số Lie	Mô tả của đại số Lie	Số chiều
Sp(n) đối với $n \geqslant 3$	nhóm ngẫu đối compact: matrix $n \times n$ đơn nguyên quaternion	compact, đơn liên thông; $\pi_0 = \pi_1 = 0$	sp(n)	matrix $n \times n$ quaternion A thoả $A = -A^*$, có dấu móc Lie là giao hoán tử; đơn và nửa đơn	$n(2n+1)$
U(n)	nhóm đơn nguyên: matrix $n \times n$ đơn nguyên phức	không đơn liên thông, compact; *không phải là* một nhóm/đại số Lie phức; $\pi_0 = 0$, $\pi_1 = \mathbb{Z}$; đẳng cấu với S^1 đối với $n = 1$	u(n)	matrix $n \times n$ phức A thoả $A = -A^*$, có dấu móc Lie là giao hoán tử	n^2
SU(n)	nhóm đơn nguyên đặc biệt: matrix $n \times n$ đơn nguyên phức có định thức bằng 1	đơn liên thông, compact; *không phải là* một nhóm/đại số Lie phức; $\pi_0 = \pi_1 = 0$	su(n)	matrix $n \times n$ phức A với vết bằng 0 thoả $A = -A^*$, có dấu móc Lie là giao hoán tử; đối với $n \geqslant 2$ đơn và nửa đơn	$n^2 - 1$
2. Các nhóm phức[c]					phức
$\mathbb{C}^n$	phép tính nhóm là phép cộng	Abel, đơn liên thông, không compact; $\pi_0 = \pi_1 = 0$	$\mathbb{C}^n$	Abel, dấu móc Lie là 0	n
$\mathbb{C}^\times$	số phức khác 0 với phép nhân	Abel, không đơn liên thông, không compact; $\pi_0 = 0$, $\pi_1 = \mathbb{Z}$	$\mathbb{C}$	Abel, dấu móc Lie là 0	1
GL($n, \mathbb{C}$)	nhóm tuyến tính tổng quát: matrix n x n phức khả nghịch đảo	đơn liên thông, không compact; $\pi_0 = 0$, $\pi_1 = \mathbb{Z}$; đối với $n = 1$ đẳng cấu với $\mathbb{C}^\times$	M($n, \mathbb{C}$)	matrix n x n, có dấu móc Lie là giao hoán tử	n^2
SL($n, \mathbb{C}$)	nhóm tuyến tính đặc biệt: matrix phức có định thức bằng 1	đơn liên thông; đối với $n \geqslant 2$ không compact; $\pi_0 = \pi_1 = 0$; SL($2, \mathbb{C}$) đẳng cấu với Spin($3, \mathbb{C}$) và Sp($2, \mathbb{C}$)	sl($n, \mathbb{C}$)	matrix n x n có vết bằng 0, có dấu móc Lie là giao hoán tử; đơn, nửa đơn; sl($2, \mathbb{C}$) đẳng cấu với su($2, \mathbb{C}$) $\otimes \mathbb{C}$	$n^2 - 1$

BẢNG 37 (Tiếp theo) Tính chất của các nhóm Lie thực và phức quan trọng nhất.

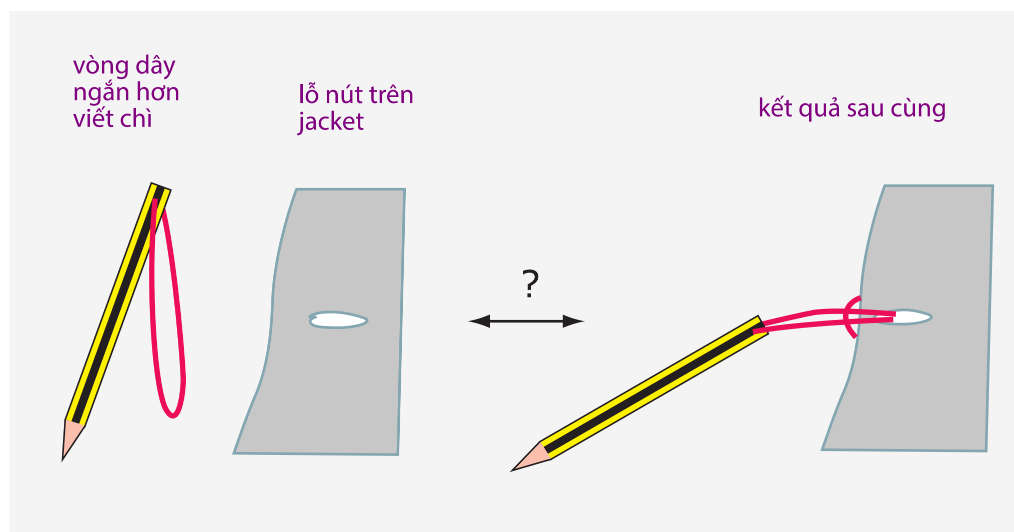
NHÓM LIE	MÔ TẢ	TÍNH CHẤT[a]	ĐẠI SỐ LIE	MÔ TẢ CỦA ĐẠI SỐ LIE	SỐ CHIỀU
PSL(2, ℂ)	nhóm tuyến tính xạ ảnh đặc biệt; đẳng cấu với nhóm Möbius, với nhóm Lorentz bị giới hạn $SO^+(3, 1, ℝ)$ và với SO(3, ℂ)	không compact; $\pi_0 = 0$, $\pi_1 = ℤ_2$	sl(2, ℂ)	matrix 2 x 2 với vết bằng 0, có dấu móc Lie là giao hoán tử; sl(2, ℂ) đẳng cấu với su(2, ℂ) ⊗ ℂ	3
O(n, ℂ)	nhóm trực giao: matrix trực giao phức	không liên thông; đối với $n \geqslant 2$ không compact; $\pi_0 = ℤ_2$, không có π_1	so(n, ℂ)	matrix n x n phức đối xứng lệch, dấu móc Lie là giao hoán tử	$n(n-1)/2$
SO(n, ℂ)	nhóm trực giao đặc biệt: matrix trực giao phức có định thức bằng 1	đối với $n \geqslant 2$ không compact; không đơn liên thông; $\pi_0 = 0$, đối với $n = 2$: $\pi_1 = ℤ$, đối với $n \geq 2$: $\pi_1 = ℤ_2$; không-Abel đối với $n > 2$, SO(2, ℂ) Abel và đẳng cấu với $ℂ^\times$	so(n, ℂ)	matrix n x n phức đối xứng lệch, dấu móc Lie là giao hoán tử; đối với $n = 3$ và $n \geqslant 5$ đơn và nửa đơn	$n(n-1)/2$
Sp($2n$, ℂ)	nhóm ngẫu đối: matrix ngẫu đối phức	không compact; $\pi_0 = \pi_1 = 0$	sp($2n$, ℂ)	matrix phức thoả $JA + A^T J = 0$ trong đó J là matrix đối xứng lệch tiêu chuẩn;[b] đơn và nửa đơn	$n(2n+1)$

a. *Nhóm của các thành phần* π_0 của một nhóm Lie được cho ở đây; bậc của π_0 là số thành phần của nhóm Lie. Nếu nhóm là tầm thường (0) thì nhóm Lie liên thông. *Nhóm cơ bản* π_1 của một nhóm Lie liên thông được cho ở đây. Nếu nhóm π_1 là tầm thường (0) thì nhóm Lie đơn liên thông. Bảng này dựa trên bảng trong Wikipedia, địa chỉ en.wikipedia.org/wiki/Table_of_Lie_groups.
b. Matrix đối xứng lệch tiêu chuẩn J hạng $2n$ là $J_{kl} = \delta_{k,n+l} - \delta_{k+n,l}$.
c. Nhóm Lie phức và đại số Lie có thể được xem như nhóm Lie thực và đại số Lie thực có số chiều gấp đôi.

CÁC CÂU ĐỐ VUI VÀ LẠ VỀ TOÁN HỌC

Câu đố 190 ny

Có một định lý topo phát biểu rằng: bạn không thể chải một trái banh có tóc. Bạn có thể chứng minh điều này không?



HÌNH 189 Ảo thuật bàn tay ma thuật nổi tiếng: làm cho bạn bè nổi điên bằng cách thêm một cây viết chì vào áo jacket của họ.

* *

Topo thật là vui. Nếu bạn muốn cười trong nửa giờ, hãy gắn một cây viết chì đã biến đổi như trong Hình 189, vào một khuyết áo và để cho mọi người tìm cách lấy ra.

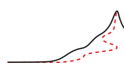
* *

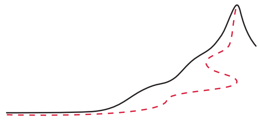
Có ít nhất 6 cách để kiếm 1 triệu dollar nhờ nghiên cứu toán học. Viện toán học Clay ở trang www.claymath.org đã treo một giải thưởng như vậy dành cho những tiến bộ quan trọng thuộc 7 chủ đề sau:

— chứng minh giả định Birch và Swinnerton–Dyer về phương trình đại số;
— chứng minh giả định Poincaré về đa tạp topo;
— giải phương trình Navier–Stokes đối với lưu chất;
— tìm tiêu chuẩn phân biệt các bài toán số P và NP;
— chứng minh giả thuyết Riemann phát biểu rằng zero không tầm thường của hàm zeta nằm trên một đường thẳng;
— chứng minh giả định Hodge;
— chứng minh mối liên hệ giữa lý thuyết Yang–Mills và khe khối lượng trong Thuyết trường lượng tử.

Quyển VI, trang 345

Giả định Poincaré đã được Grigori Perelman giải vào năm 2002; về 6 chủ đề còn lại, mỗi tiến bộ có thực chất sẽ mang lại cho bạn một căn nhà.





Gợi ý và lời giải các câu đố

Câu đố 1, trang 10: Đừng vội vã đòi hỏi khắt khe. Ấn bản kế tiếp của sách sẽ được lợi vì điều này.

Câu đố 2, trang 17: *Virus* là một thí dụ. Nó không có sự biến dưỡng riêng. Ngoài ra, một số loài virus có khả năng tạo ra tinh thể *không phải là* bằng chứng để cho rằng chúng không phải là sinh vật khác với điều ta thường nói. Ngoài virus còn *prion*, *viroid* và *virusoid* là các thí dụ về hệ không sống nhưng có thể tự sinh sản. Một thí dụ khác, không có ranh giới giữa vật chất sống và không sống, là *tardigrade*. Các động vật nhỏ này, kích thước khoảng 1 mm, có thể vắt hết nước, tồn tại trong tình trạng khô – hay “chết” – trong nhiều năm và hồi sinh khi nhỏ vào chúng một giọt nước.

Câu đố 3, trang 18: Hệ đạo hàng của ruồi là một thí dụ.

Câu đố 6, trang 22: Nhiệt năng kT khoảng 4 zJ và thời gian hồi phục điển hình là 0.1 ps.

Câu đố 10, trang 30: Lý luận đúng.

Câu đố 8, trang 30: Hiện tại thì không thể. Nếu bạn có cách hãy công bố nó. Điều này giúp cho các bà mẹ đơn thân sầu não không có trợ cấp tài chánh của chồng, dù đã đi kiện, vì người ta không thể phán quyết ai đúng là cha của đứa bé.

Câu đố 9, trang 30: Cặp sinh đôi vẫn có thể xem là hai người khác nhau và có số phận khác nhau. Ảnh hưởng của tử cung khác nhau nên khí chất của họ sẽ khác nhau. Trải nghiệm khi sinh sẽ khác; đây là xúc cảm mãnh liệt nhất của mỗi người, ảnh hưởng mạnh đến nỗi kinh sợ và tính cách của họ. Người cha của đứa con già hay trẻ cũng có ảnh hưởng. Nếu tử cung không phải là của mẹ ruột thì sự khác biệt về kinh nghiệm còn nhiều hơn nữa.

Câu đố 11, trang 30: Hãy công bố kết quả của bạn.

Câu đố 12, trang 31: Có, nhưng chỉ ở các con còn nhỏ. Tại sao?

Câu đố 13, trang 31: Lý do của sự đối xứng ở động vật khá đơn giản: không có đối xứng, chúng không thể di chuyển theo một đường *thẳng*.

Câu đố 14, trang 31: Các hoá chất của sự sống được tổng hợp bên trong cơ thể; sự bất đối xứng đã được di truyền qua các thế hệ. Sự bất đối xứng chung chứng tỏ rằng mọi sinh vật đều có chung nguồn gốc.

Câu đố 15, trang 31: Cứ cho là đàn ông thì giống hắc tinh tinh hơn đàn bà. Nhưng nói nghiêm chỉnh hơn thì dữ liệu đã cho, mặc dù được trích dẫn thường xuyên, là sai. Các thí nghiệm gần đây do Roy Britten tiến hành năm 2002 đã chứng tỏ rằng sự khác nhau trong bộ gen của người và hắc tinh tinh là khoảng 5 % (Xem R. J. Britten, *Divergence between samples of chimpanzee and human DNA sequences is 5 %, counting indels*, Proceedings of the National Academy of Sciences **99**, pp. 13633–13635, 15th of October, 2002.) Ngoài ra, mặc dù sự khác nhau giữa nam và nữ là cả một nhiễm sắc thể nhưng kích thước lớn của nhiễm sắc thể X so với kích thước nhỏ của nhiễm sắc thể Y dẫn tới kết quả là đàn ông có vật liệu di truyền ít hơn đàn bà khoảng 3 %. Tuy vậy, tất cả đàn ông đều có một nhiễm sắc thể X. Điều này giải thích cho việc vẫn còn các số đo khác để thấy rằng mọi người có ít nhất 99.9 % gene giống nhau.

Câu đố 18, trang 34: Các quá trình hoá học, bao gồm sự khuếch tán và tốc độ phản ứng, phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ. Chúng ảnh hưởng đến tốc độ chuyển động của cá thể và cơ hội sinh tồn. Giữ nhiệt độ ổn định là điều quan trọng đối với các dạng sinh vật đã tiến hoá.

Câu đố 19, trang 34: Người ta không biết chút gì về những bước đầu tiên. Những quá trình tiếp theo đem lại sự phức tạp cho tế bào đã được tìm hiểu nhiều hơn.

Câu đố 20, trang 34: Vì mọi nguyên tử tạo nên chúng ta có nguồn gốc từ không gian bên ngoài nên câu trả lời là có. Nhưng nếu nói rằng tế bào sinh học đến từ không gian thì câu trả lời là không vì đa số tế bào không thích chân không. DNA cũng vậy.

Đúng ra sự sống và sự sinh sản là tính chất của các hệ phức tạp. Nói cách khác, việc hỏi rằng sự sống có đến từ không gian ngoài Trái đất hay không cũng giống như hỏi rằng: 'Nguồn gốc của bảo hiểm xe hơi là không gian bên ngoài Trái đất phải không?'

Câu đố 22, trang 40: Bạn chưa thử sao? Vật lý là khoa học thực nghiệm.

Câu đố 28, trang 48: Phân rã theo quy luật hàm số mũ xảy ra khi xác suất phân rã là một hằng số theo thời gian. Đối với con người thì điều này không đúng. Tại sao không đúng?

Câu đố 29, trang 51: Không có các quá trình phi vật lý: mọi điều quan sát được đều là các quá trình vật lý. Ý thức bắt nguồn từ các quá trình trong não tức là trong vật chất nên nó là các quá trình lượng tử. Ở nhiệt độ của cơ thể thì sự điều hợp có thời gian sống nhỏ hơn quá trình tư duy điển hình rất nhiều.

Câu đố 30, trang 52: Phương pháp xác định niên đại bằng phép đo phóng xạ dựa trên tương tác hạt nhân, mặc dù việc phát hiện có tính chất điện từ.

Câu đố 31, trang 53: Mọi máy đo ánh sáng đều được xem là có tương đối tính vì ánh sáng chuyển động với tốc độ cực đại. Cảm biến chạm không có tương đối tính theo nghĩa thông thường của từ này vì tốc độ liên quan quá nhỏ. Năng lượng nhỏ so với năng lượng còn lại; điều này đúng ngay cả khi năng lượng tín hiệu chỉ được phân bố cho các electron.

Câu đố 32, trang 53: Tiếng ồn do hiệu ứng quang âm; ánh sáng tuần hoàn nung nóng không khí trong lọ mứt ở phần bị bôi đen và tạo ra âm thanh. Xem M. EULER, *Kann man Licht hören?*, Physik in unserer Zeit **32**, pp. 180–182, 2001.

Câu đố 33, trang 55: Điều này hàm ý rằng không thể có sự phục sinh, sự đầu thai hay sự bất tử.

Câu đố 36, trang 65: Ethanol bẻ gẫy các liên kết hydrogen giữa các phân tử nước nên tính trung bình, chúng đến gần nhau hơn. Ta có thể tìm thấy video của thí nghiệm này tại www.youtube.com/watch?v=LUW7a7H-KuY.

Câu đố 39, trang 66: Bạn kiếm được màu vàng đậm do sự tạo ra chì iodide (PbI_2).

Câu đố 41, trang 71: Cách gói cam trên bàn là cách đóng gói các hình cầu dày đặc nhất.

Câu đố 42, trang 74: Chỉ cần dùng một hình vẽ trên giấy. Vẽ một đa giác và hình của nó ở những thời điểm sau đó, có tính đến tốc độ các cạnh dài thêm theo thời gian. Bạn sẽ thấy các cạnh dài ra nhanh biến đi như thế nào theo thời gian.

Câu đố 43, trang 84: Điều này có thể làm được bằng cách kết hợp các phương pháp của Bảng 7.
Xem 304 Đúng ra người ta đã dùng tia vũ trụ để thám hiểm bên trong kim tự tháp vào thập niên 1960. Kết quả là không tìm được thêm căn phòng nào.

Câu đố 45, trang 87: Một trái núi nặng nề sẽ đẩy lớp vỏ Trái đất lún sâu vào lớp mantle làm nó chảy ra khiến cho đỉnh núi bị hạ thấp xuống.

Câu đố 46, trang 88: Sự phát triển chỉ mới bắt đầu; kết quả còn khác xa bản gốc vì chúng phải thoả điều kiện thứ 2 đối với 'bản sao' của lông vũ và latex: bản sao phải rẻ hơn bản gốc. Điều kiện này còn khó hơn điều kiện đầu.

Câu đố 47, trang 89: Khoảng 0.2 m.

Câu đố 49, trang 89: Vì thế luôn có chiều cao hữu hạn nên ta luôn có thể vượt qua tường nhờ hiệu ứng xuyên hầm.

Câu đố 50, trang 89: Nắp hộp không bao giờ đứng yên để bảo đảm cho việc đóng kín vì nó luôn chuyển động do lượng tử tác dụng.

Câu đố 52, trang 90: Đơn vị của độ dẫn nhiệt là $T\pi^2k^2/3\hbar$, trong đó T là nhiệt độ và k là hằng số Boltzmann.

Câu đố 53, trang 91: Không thể có cấu trúc cực mảnh vì 2 lý do: Một, cấu trúc được tạo ra từ các vật liệu thuần nhất không thể đạt được tỷ lệ như vậy; hai, dáng uốn cong của cây cối thường không được tán thưởng trong kiến trúc do con người tạo dựng.

Câu đố 54, trang 93: Người ta có thể đo được nồng độ từ các chỏm băng địa cực bằng cách đo độ biến thiên của nồng độ đồng vị theo độ sâu. Trong hiện tượng hoá hơi và ngưng tụ của nước, tỷ số đồng vị phụ thuộc vào nhiệt độ. Số đo ở Nam cực và Greenland trùng nhau, nên rất đáng tin cậy.

Câu đố 55, trang 94: Trong mùa hè, nhựa đường mềm.

Câu đố 58, trang 113: Cái mà người ta đã liệng đi. Chi phí năng lượng khoảng 10 cents/kWh. Đối với đèn mới thì đèn huỳnh quang thân thiện nhất với môi trường mặc dù nó ít thân thiện với mắt và não do sự nhấp nháy của nó.

Câu đố 59, trang 118: Giấc mơ xưa này phụ thuộc vào các điều kiện chính xác. Màn hình phải mềm dẻo cỡ nào? Tuổi thọ của nó? Báo chí giống như màn hình đã nhiều năm không có mặt và có lẽ sẽ không thể có mặt.

Câu đố 60, trang 118: Chỉ có câu trả lời mang tính suy đoán; khuynh hướng của các nhà nghiên cứu là trả lời ‘không’.

Câu đố 61, trang 118: Thách thức ở đây là tìm ra một cách ít tốn kém để làm lệch có kiểm soát các chùm laser. Đã có laser giá rẻ.

Câu đố 62, trang 118: Không, vì định luật bảo toàn động lượng và định lý không-nhân bản vô tính.

Câu đố 63, trang 119: Có nhiều công ty thử bán các hệ mã hoá lượng tử; tuy nhiên dù có sự đầu tư về kỹ thuật nhưng thành công về mặt thương mại vẫn có chỗ đáng ngờ.

Câu đố 64, trang 119: Tôi đã tiên đoán từ năm 2000 rằng hàng hoá sản xuất hàng loạt bằng cách sử dụng công nghệ này (bán được ít nhất 1 triệu bản) sẽ không có trước năm 2025.

Câu đố 65, trang 119: Có thể nhưng giá cực kỳ cao.

Câu đố 66, trang 120: Có thể có thiết bị như vậy: nó sử dụng một laser 3.39 µm, một máy dò và một số quang cụ đặt trên một giá 3 chân. Độ nhạy đối với sự hấp thụ rượu thì tuyệt hảo. Tương lai mới có câu trả lời.

Câu đố 67, trang 125: Bạn có thể thay đổi lực hấp dẫn giữa 2 gương.

Câu đố 68, trang 125: Thông thường trong những phát biểu như vậy, thì vận tốc nhóm hay vận tốc phase được đưa ra chứ không phải vận tốc năng lượng tương ứng, là vận tốc luôn luôn nhỏ hơn c.

Câu đố 69, trang 128: Không có tiếng vang khi ta đạt tới tốc độ âm hay không rõ khi ta tiến gần tới tốc độ âm. Cả tốc độ ánh sáng lẫn tốc độ âm đều hữu hạn. Chuyển động cùng với gương vẫn có ảnh. Điều này có nghĩa là ta không thể đạt tới tốc độ ánh sáng. Vì không thể đạt tới nên nó phải như nhau đối với mọi quan sát viên.

Câu đố 70, trang 129: Gương thường không làm việc với vật chất; ngoài ra, nếu chúng phát ra vật chất, vật có năng lượng nghỉ, thì gương phải có gia tốc lớn hơn rất nhiều.

Câu đố 73, trang 131: Bán kính cổ điển của electron, là kích thước mà tại đó năng lượng của trường tạo nên toàn bộ khối lượng của electron, khoảng 137 lần nhỏ hơn (rất nhiều) bước sóng Compton của electron.

Câu đố 74, trang 133: Phần nhô ra có thể có giá trị bất kỳ. Không có giới hạn. Nếu kể thêm hệ thức bất định thì sẽ có một giới hạn là trọng tâm của lá bài/viên gạch cuối cùng không được nằm trên cạnh bàn.

Câu đố 75, trang 133: Nếu điện tích lớn hơn sẽ dẫn tới một trường mạnh, tự phát sinh ra các cặp electron positron; electron sẽ rơi vào hạt nhân làm giảm điện tích đi 1 đơn vị.

Câu đố 77, trang 133: Hiệu ứng Hall sinh ra từ hiện tượng lệch hướng của electron trong kim loại do từ trường. Do đó nó phụ thuộc vào tốc độ của chúng. Người ta kiếm được giá trị khoảng 1 mm. Trong nguyên tử ta có thể sử dụng mô hình nguyên tử Bohr như một xấp xỉ.

Câu đố 78, trang 133: Các bậc bắt nguồn từ bản chất hạt của điện và các thực thể chuyển động.

Câu đố 79, trang 134: Nếu ta có thể áp dụng nghịch lý Banach–Tarski cho chân không thì hình
Quyển I, trang 59 như là ta có thể tách một cách dễ dàng, một trái banh chân không thành *2* trái banh chân không, có cùng thể tích như trái banh gốc. Nói cách khác một trái banh với năng lượng chân không E không thể phân biệt với 2 trái banh năng lượng chân không $2E$.

Ta đã sử dụng nghịch lý Banach–Tarski theo cách này để chứng tỏ rằng chocolate (hay chất
Quyển I, trang 332 bất kỳ khác) có một chiều dài riêng. Nhưng ta *không* biết được là ta có thể suy diễn rằng chân không có độ dài riêng hay không. Thật vậy, nghịch lý không thể áp dụng cho chân không vì *2* lý do. Một, thật ra có một năng lượng cực đại và chiều dài cực tiểu trong thiên nhiên. Hai, không có chỗ nào trong thiên nhiên không có năng lượng chân không; vì vậy không có chỗ để ta có thể đặt trái banh thứ 2. Như vậy ta không thể biết lý do nghịch lý Banach–Tarski không thể áp dụng đối với chân không, và như vậy không thể sử dụng nó để suy ra sự hiện hữu của một chiều dài cực tiểu trong chân không.

Tốt hơn ta nên lý luận theo cách sau đây. Nếu không có ngưỡng chiều dài riêng thì năng lượng chân không sẽ là vô hạn. Tuy vậy thí nghiệm chứng tỏ rằng nó hữu hạn.

Câu đố 80, trang 134: Bùn là một thể huyền phù của cát; cát không trong suốt mặc dù có cấu tạo là thạch anh do sự tán xạ của ánh sáng tại các mặt không đều của các hạt cát. Huyền phù không thể trong suốt nếu chiết suất của chất lỏng và của các hạt lơ lửng khác nhau. Nó không bao giờ trong suốt nếu các hạt không trong suốt.

Câu đố 81, trang 134: Không, vì các hệ hợp thành không thể nhỏ hơn bước sóng compton của riêng chúng; chỉ có các hệ sơ cấp thì có thể. Tuy vậy, vũ trụ không phải là một hệ vì nó không có môi trường bao quanh. Như vậy chiều dài không phải là một khái niệm được định nghĩa chính xác vì ta cần một môi trường để đo và xác định nó. (Ngoài ra, ta cũng cần tính đến lực hấp dẫn trong các vùng này). Như vậy câu trả lời là: trong những miền như vậy thì câu hỏi vô nghĩa.

Câu đố 82, trang 135: Các phương pháp di chuyển trên băng trơn trong Cơ học:

— nếu băng hoàn toàn phẳng, ta chỉ có thể đứng yên tại 1 điểm – nếu không thì bạn chỉ có thể dao động quanh điểm đó như trong câu đố 26;
— không làm gì mà chỉ cần chờ cho gia tốc hướng tâm của phần trên của cơ thể kéo bạn đi;
— để quay tròn bạn chỉ cần quay cánh tay trên đầu;
— ném giày hay vật gì đó ra xa;
— hít vào theo phương thẳng đứng rồi thở ra (hay nói chuyện) theo phương nằm ngang (hoặc ngược lại);
— chờ bị đẩy đi do gia tốc hướng tâm bắt nguồn từ sự tự quay (và hình dạng dẹt 2 đầu) của Trái đất;
— nhảy lên đều đặn: gia tốc Coriolis sẽ gây ra chuyển động ngang;
— chờ Mặt trời hay Mặt trăng kéo đi giống như thuỷ triều;

— ‘bơi’ trong không khí bằng tay và chân;
— chờ một con chim, ong bắp cày, giọt mưa rơi xéo, gió, dung nham, động đất, kiến tạo mảng hay các vật thể vĩ mô khác đẩy vào người (tất cả các vật đẩy chỉ tính là một giải pháp);
— chờ được di chuyển nhờ sự thay đổi của trọng lực do sự đối lưu của mantle trong Trái đất;
— chờ được di chuyển nhờ lực hấp dẫn của các sao chổi bay ngang qua;
— chỉ tính đối với trẻ em: khạc nhổ, hắt hơi, ho, trung tiện, tiểu tiện; và dùng tai giống như cánh.

Nên nhớ việc dán lưỡi không khả thi trên băng trơn.

Câu đố 83, trang 135: Các phương pháp di chuyển trên băng trơn bằng cách sử dụng Nhiệt động lực học và Điện động lực học:

— sử dụng các trạm radio/TV gần đó để đẩy bạn đi;
— sử dụng mobile phone và một cái gương;
— bật một đèn pin để ánh sáng đẩy bạn đi;
— nhờ chuyển động Brown trong không khí đẩy đi;
— hơ nóng một bên cơ thể để bức xạ thể đen đẩy bạn đi;
— hơ nóng một bên cơ thể bằng hoạt động của cơ: các luồng khí hay sự bay hơi sẽ đẩy bạn đi;
— chờ cho một phần cơ thể lạnh hơn bên kia và chờ tác dụng của bức xạ của thể đen tương ứng;
— chờ từ trường của Trái đất kéo một số mảnh kim loại, thiết từ hay thuận từ, trong y phục hay trong cơ thể của bạn;
— chờ áp suất ánh sáng, tức là photon từ Mặt trời hay các ngôi sao đẩy vào bạn; có thể dùng thêm một cái gương để gia tăng hiệu quả;
— cọ xát một vật polymer để tích điện cho nó rồi di chuyển nó thành vòng tròn, nhằm tạo ra một từ trường tương tác với từ trường của Trái đất.

Nên nhớ mặt không ma sát hoàn toàn không chảy ra.

Câu đố 84, trang 135: Các phương pháp di chuyển trên băng trơn bằng cách sử dụng Thuyết tương đối tổng quát:

— chuyển động một cánh tay để phát xạ bức xạ hấp dẫn;
— làm lệch hướng bức xạ nền vũ trụ bằng một cái gương;
— chờ lực đẩy của bức xạ hấp dẫn phát ra từ sự suy sụp của sao;
— chờ cho vũ trụ co lại.

Câu đố 85, trang 135: Các phương pháp di chuyển trên băng trơn bằng cách sử dụng Thuyết lượng tử:

— chờ cho hàm sóng của bạn trải rộng và suy sụp ở cuối mặt băng;
— chờ cho các mảnh kim loại trong y phục hút kim loại ở chung quanh nhờ hiệu ứng Casimir;
— chờ bị đẩy đi nhờ sự phân rã phóng xạ trong cơ thể.

Câu đố 86, trang 135: Các phương pháp di chuyển trên băng trơn bằng cách sử dụng: Khoa học vật liệu, Địa vật lý và Vật lý thiên văn;

— bị đẩy đi nhờ sóng vô tuyến phát ra từ các cơn sấm sét và được hấp thu trong các khớp xương đau đớn;
— chờ bị đẩy đi bằng tia vũ trụ;
— chờ bị đẩy đi bằng gió mặt trời;
— chờ bị đẩy đi bằng neutrino mặt trời;
— chờ bị đẩy đi nhờ sự biến đổi Mặt trời thành sao kềnh đỏ;

— chờ bị tống đi bằng một mảnh thiên thạch.

Câu đố 87, trang 135: Một phương pháp di chuyển trên băng trơn bằng cách sử dụng Sự tự tổ chức, Lý thuyết hỗn độn và Sinh vật lý:

— chờ các dòng điện trong não tương tác với từ trường của Trái đất bằng cách kiểm soát tư tưởng.

Câu đố 88, trang 135: Các phương pháp di chuyển trên băng trơn bằng cách sử dụng sự hấp dẫn lượng tử:

— gia tốc một gương nhỏ bằng bàn tay;
— làm lệch hướng bức xạ Unruh của Trái đất bằng 1 cái gương nhỏ;
— chờ cho proton phân rã đẩy bạn đi bằng sự giật lùi.

Câu đố 90, trang 142: Đây là một câu đố mẹo: nếu bạn trả lời được, bạn có thể trực tiếp kiểm chứng câu trả lời trên quyển cuối cùng của bộ sách này. Thế hấp dẫn thay đổi phase của hàm sóng giống như các thế bất kỳ khác nhưng *việc giải thích* rõ ràng cho câu này lại nằm ở quyển 6 của bộ sách.

Câu đố 94, trang 144: Không. Trạng thái liên kết của các hạt không khối lượng luôn luôn không bền.

Câu đố 95, trang 146: Điều này chỉ dễ nếu kích thước hố đen được đưa vào trong giới hạn entropy của Bekenstein. Ta vẫn chưa có một suy diễn đơn giản về entropy của hố đen bao gồm thừa số 1/4; điều này sẽ được bàn thêm trong quyển cuối.

Câu đố 96, trang 146: Một giới hạn entropy sẽ kéo theo một giới hạn thông tin; chỉ có thể có một thông tin có mặt tại một vùng đã cho của thiên nhiên. Điều này tạo ra một giới hạn về bộ nhớ.

Câu đố 97, trang 146: Theo đơn vị tự nhiên thì biểu thức chính xác của entropy là $S = 0.25A$. Nếu mỗi diện tích Planck mang 1 bit (bậc tự do), entropy sẽ là $S = \ln W = \ln(2^A) = A \ln 2 = 0.693A$. Số này gần bằng giá trị chính xác.

Câu đố 100, trang 152: Vũ trụ có khoảng 10^{22} ngôi sao; Mặt trời có độ trưng khoảng 10^{26} W; độ trưng tổng cộng của vật chất khả kiến trong vũ trụ là 10^{48} W. Một bùng nổ tia gamma phát xạ tới $3 \cdot 10^{47}$ W.

Câu đố 105, trang 154: Bức xạ hấp dẫn đã mang chúng đi.

Câu đố 111, trang 158: Không có hệ nào trong thiên nhiên (mà ta đã biết) phát xạ hay hấp thu mỗi lần 1 graviton. Đây là một luận chứng chống lại sự hiện hữu của graviton.

Câu đố 114, trang 168: Hai lá chồng lên nhau có cùng một tác dụng như 1 lá có cùng độ dày tổng cộng của chúng. Như vậy bề mặt không có ảnh hưởng gì.

Câu đố 116, trang 172: Electron bị giữ lại do điện tích dương của hạt nhân nếu đủ số proton, đó là trường hợp của các hạt nhân tạo nên chúng ta.

Câu đố 118, trang 180: Chu kỳ bán rã $t_{1/2}$ liên hệ với thời gian sống τ theo công thức $t_{1/2} = \tau \ln 2$.

Câu đố 119, trang 181: Con số này nhỏ so với số tế bào. Tuy vậy, sự phân rã có thể có liên hệ với sự lão hoá của con người.

Câu đố 121, trang 184: Nhờ việc đếm số phân rã và nguyên tử có độ chính xác cao.

Câu đố 123, trang 185: Độ phóng xạ cần cho việc giữ ấm Trái đất thì nhỏ; độ phóng xạ của dung nham chỉ cao hơn đất thông thường một chút.

Câu đố 124, trang 197: Không có cách để bảo toàn cả năng lượng lẫn động lượng trong một phân rã như thế.

Câu đố 125, trang 197: Việc kết hợp tia X và tia tử ngoại có cường độ cao dẫn tới hiện tượng này.

Câu đố 127, trang 211: Hạt nhân của nitrogen và carbon có điện tích lớn đẩy mạnh vào các proton.

Câu đố 129, trang 219: Xem bài báo của C.J. Hogan được để cập trong Xem 270.

Câu đố 130, trang 222: Để chạm vào một vật ta cần đến gần nó; đến gần đồng nghĩa với độ bất định thời gian và vị trí phải nhỏ; điều này dẫn tới bước sóng của đầu dò sử dụng trong việc tiếp xúc phải nhỏ; tức là năng lượng phải lớn.

Câu đố 132, trang 229: Quá trình có bản chất điện từ nên điện tích quy định tần số xảy ra chúng.

Câu đố 133, trang 238: Việc thiết kế vũ khí hạt nhân không khó. Sinh viên có thể làm được việc này, thậm chí làm được nhiều lần. Những sinh viên đầu tiên làm như vậy là 2 sinh viên học vật lý năm 1964, chuyện được kể trên www.guardian.co.uk/world/2003/jun/24/usa.science. Việc nghĩ ra và tạo dựng một bản thiết kế không khó. Nhưng vấn đề khó nhất là kiếm hay tạo nên vật liệu hạt nhân. Nó cần nhiều hoạt động tội phạm, nhiều nỗ lực về kỹ thuật, nhiều nhà máy lớn, phát triển và sự phối hợp của nhiều hoạt động công nghệ. Quan trọng nhất, một dự án như vậy cần sự đầu tư tài chánh khổng lồ, mà các nước nghèo không đủ khả năng nếu không có sự hy sinh lớn lao của toàn dân. Như vậy vấn đề không phải là kỹ thuật mà là tài chánh.

Câu đố 137, trang 268: Năm 2008, có khoảng 98 % các nhà vật lý đồng ý. Thời gian sẽ cho biết họ đúng hay sai.

Câu đố 139, trang 280: Khối lượng 100 kg và tốc độ 8 m/s cần diện tích cánh là 43 m^2.

Câu đố 141, trang 287: Câu hỏi đánh lạc hướng. Thế giới có 3 chiều.

Câu đố 142, trang 290: Ta tìm góc quay lớn nhất $\Delta\varphi$ có thể đạt được trong 1 kỳ C bằng cách cực đại hoá tích phân

$$\Delta\varphi = -\int_C \frac{a^2}{a^2+b^2}\,\mathrm{d}\theta \tag{151}$$

Vì đường C đóng nên ta có thể sử dụng định lý Stokes để biến tích phân đường thành tích phân mặt trên mặt S được C bao quanh:

$$\Delta\varphi = \int_S \frac{2ab^2}{(a^2+b^2)^2}\,\mathrm{d}a\,\mathrm{d}\theta\ . \tag{152}$$

Góc cực đại được tìm ra với chú ý θ nằm trong khoảng từ 0 tới π và a thay đổi từ 0 tới ∞. Kết quả

$$\Delta\varphi_{\max} = \int_{\theta=0}^{\pi}\int_{a=0}^{\infty} \frac{2ab^2}{(a^2+b^2)^2}\,\mathrm{d}a\,\mathrm{d}\theta = \pi\ . \tag{153}$$

Câu đố 144, trang 293: Một đám mây được giữ cho nổi và đầy đặn nhờ các dòng đối lưu. Mây không đối lưu thường gặp trong mùa hè: chúng khuếch tán và biến mất. Chi tiết về các dòng khí bên trong và bên ngoài đám mây phụ thuộc vào kiểu mây và thuộc một lĩnh vực nghiên cứu riêng.

Câu đố 147, trang 300: Mạng không đẳng hướng, không phải là bất biến Lorentz.

Câu đố 149, trang 303: Đối với số thì tổng vô hạn không xác định; tuy vậy, đối với dây có gút thì nó xác định.

Câu đố 150, trang 304: Cuộc chạy đua tìm lời giải vẫn đang tiếp diễn nhưng mục tiêu vẫn còn xa.

Câu đố 151, trang 305: Đây là một câu hỏi đơn giản nhưng khó. Hãy tìm ra câu trả lời!

Câu đố 153, trang 308: Giọt mưa lớn là một bánh pancake phình to ở ngoài viền. Khi kích thước tăng lên, tức là khi giọt mưa lớn rơi trong không khí, nó bị tách ra vì màng mỏng ở trung tâm bị xé rách.

Câu đố 154, trang 308: Nó là một hình vẽ; nếu xem nó là một hình 3 chiều thì nó không hiện hữu, hoặc không đóng, hay là một ảo thị quang học của một hình xuyến.

Câu đố 155, trang 308: Xem T. Fink & Y. Mao, *The 85 Ways to Tie a Tie*, Broadway Books, 2000.

Câu đố 156, trang 309: Xem T. Clarke, *Laces high*, Nature Science Update 5th of December, 2002, or www.nature.com/nsu/021202/021202-4.html.

Câu đố 158, trang 310: Đúng ra chưa có ai cố gắng làm việc này. Cũng có thể đây là một vấn đề vô nghĩa.

Câu đố 160, trang 315: Phần lớn các tính chất của vật chất vĩ mô rơi vào trường hợp này, như sự thay đổi của mật độ nước theo nhiệt độ.

Câu đố 162, trang 321: Trước khi kiểm chứng suy đoán này ta cần làm rõ mối liên hệ giữa hạt và hố đen.

Câu đố 163, trang 322: Đừng mong chờ một lời giải đúng cho các lựa chọn mang tính cá nhân. Hãy làm những gì mà bạn nghĩ và cảm thấy là đúng.

Câu đố 167, trang 330: Giới hạn Planck có thể bị vượt qua đối với nhiều biến động lực trong trường hợp mà hệ nhiều hạt có thể vượt qua giới hạn của 1 hạt đơn lẻ, như khối lượng, động lượng, năng lượng hay điện trở.

Câu đố 169, trang 332: Đừng quên sự giãn thời gian tương đối tính.

Câu đố 170, trang 332: Công thức với $n - 1$ thích hợp hơn. Tại sao?

Câu đố 175, trang 339: Tốc độ chậm lại *có bậc 2* theo thời gian vì mỗi lần chậm mới được cộng vào lần chậm cũ!

Câu đố 176, trang 340: Không, chỉ có các tính chất của một số phần trong vũ trụ được liệt kê. Tự vũ trụ không có tính chất, như ta sẽ trình bày chi tiết trong phần cuối của cuộc thám hiểm này.

Câu đố 177, trang 342: Các hằng số liên kết chuẩn, thông qua chiều dài Planck, xác định kích thước nguyên tử, cường độ liên kết hoá học và kích thước của mọi vật.

Câu đố 178, trang 357: Liên kết cộng hoá trị dẫn tới việc tạo ra các lớp vỏ đầy; đây là lý do độ chênh lệch giảm dần theo chiều qua phải bảng tuần hoàn.

Câu đố 179, trang 360: Lời giải là tập hợp tất cả các matrix 2 x 2, vì mỗi matrix 2 x 2 xác định một phép biến đổi tuyến tính, nếu nó xác định một điểm biến đổi là tích của điểm và matrix này. (Chỉ có phép nhân với một matrix cố định mới có thể cho một phép biến đổi tuyến tính). Bạn có thể nhận biết từ một matrix đó là một phép quay, phản xạ, giãn dài, trượt, hay kéo giãn theo 2 trục không? Các khả năng còn lại là gì?

Câu đố 182, trang 360: Tích (đơn giản nhất) của 2 hàm được tính bằng phép nhân từng điểm một.

Câu đố 183, trang 361: Chuẩn $\|f\|$ của một hàm thực f được xác định là cận trên đúng của giá trị tuyệt đối của nó:

$$\|f\| = \sup_{x \in \mathrm{R}} |f(x)| \ . \qquad (154)$$

Nói một cách đơn giản: chuẩn là giá trị cực đại của giá trị tuyệt đối của hàm. Nó còn được gọi là chuẩn 'sup'. Vì nó chứa một cận trên đúng, nên chuẩn chỉ xác định trên không gian con của các

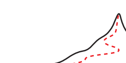
hàm liên tục *bị giới nội* trên không gian X, hay, nếu X compact, trên không gian của mọi hàm liên tục (vì một hàm liên tục trên một không gian compact phải bị giới nội).

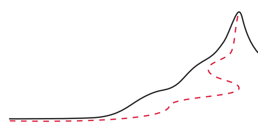
Câu đố 184, trang 364: Chui đầu ra ngoài rồi kéo một bên của áo thun lên trên cánh tay tương ứng, rồi lên trên tay kia; sau đó kéo bên kia xuống dưới cánh tay đầu tiên rồi cánh tay còn lại. Chui đầu vào áo trở lại. Áo thun (hay quần dài) sẽ bị lộn trái.

Câu đố 185, trang 364: Cả hai đều có thể tách rời.

Câu đố 188, trang 368: Ta có thể thực hiện phép biến đổi một đa tạp này thành một đa tạp có topo khác, với một biến đổi nhỏ, tại *điểm kỳ dị*. Vì trong thiên nhiên có tác dụng cực tiểu nên ta không thể tránh được một thay đổi tí hon đó.

Câu đố 189, trang 370: Tích $M^{\dagger}M$ có tính Hermite và có trị riêng dương. Như vậy H được xác định một cách duy nhất và có tính Hermite. U là đơn nguyên vì $U^{\dagger}U$ là matrix đơn vị.





Tài liệu tham khảo

> Gedanken sind nicht stets parat. Man schreibt auch, wenn man keine hat.*
>
> Wilhelm Busch, *Aphorismen und Reime.*

1 The use of radioactivity for breeding of new sorts of wheat, rice, cotton, roses, pineapple and many more is described by B. S. Ahloowalia & M. Maluszynski, *Induced mutations – a new paradigm in plant breeding*, Euphytica **11**, pp. 167–173, 2004. Cited on page 21.

2 See John T. Bonner, *Why Size Matters: From Bacteria to Blue Whales*, Princeton University Press, 2011. Cited on page 21.

3 See the book by Peter Läuger, *Electrogenic Ion Pumps*, Sinauer, 1991. Cited on page 21.

4 The motorized screw used by viruses was described by A.A. Simpson & al., *Structure of the bacteriophage phi29 DNA packaging motor*, Nature **408**, pp. 745–750, 2000. Cited on page 22.

5 S. M. Block, *Real engines of creation*, Nature **386**, pp. 217–219, 1997. Cited on page 22.

6 Early results and ideas on molecular motors are summarised by B. Goss Levi, *Measured steps advance the understanding of molecular motors*, Physics Today pp. 17–19, April 1995. Newer results are described in R. D. Astumian, *Making molecules into motors*, Scientific American pp. 57–64, July 2001. Cited on page 23.

7 R. Bartussek & P. Hänggi, *Brownsche Motoren*, Physikalische Blätter **51**, pp. 506–507, 1995. See also R. Alt-Haddou & W. Herzog, *Force and motion generation of myosin motors: muscle contraction*, Journal of Electromyography and kinesiology **12**, pp. 435–445, 2002. Cited on page 24.

8 N. Hirokawa, S. Niwa & Y. Tanaka, *Molecular motors in neurons: transport mechanisms and roles in brain function, development, and disease*, Neuron **68**, pp. 610–638, 2010. Cited on page 25.

9 J. Weber & A. E. Senior, *ATP synthesis driven by proton transport in F1Fo-ATP synthase*, FEBS letters **545**, pp. 61–70, 2003. Cited on page 26.

10 This truly fascinating research result, worth a Nobel Prize, is summarized in N. Hirokawa, Y. Tanaka & Y. Okada, *Left-right determination: involvement of molecular motor KIF3, cilia, and nodal flow*, Cold Spring Harbor Perspectives in Biology **1**, p. a000802, 2009, also available at www.cshperspectives.org. The website also links to numerous captivating films of the involved microscopic processes, found at beta.cshperspectives.cshlp.org. Cited on page 27.

11 R. J. Cano & M. K. Borucki, *Revival and identification of bacterial spores in 25- to 40-million-year-old Dominican amber*, Science **26**, pp. 1060–1064, 1995. Cited on page 31.

* ‘Thoughts are not always available. Many write even without them.’

12 The first papers on bacteria from salt deposits were V. R. Ott & H. J. Dombrwoski, *Mikrofossilien in den Mineralquellen zu Bad Nauheim*, Notizblatt des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung **87**, pp. 415–416, 1959, H. J. Dombrowski, *Bacteria from Paleozoic salt deposits*, Annals of the New York Academy of Sciences **108**, pp. 453–460, 1963. A recent confirmation is R. H. Vreeland, W. D. Rosenzweig & D. W. Powers, *Isolation of a 250 million-year-old halotolerant bacterium from a primary salt crystal*, Nature **407**, pp. 897–899, 2000. Cited on page 31.

13 This is explained in D. Graur & T. Pupko, *The permian bacterium that isn't*, Molecular Biology and Evolution **18**, pp. 1143–1146, 2001, and also in M. B. Hebsgaard, M. J. Phillips & E. Willerslev, *Geologically ancient DNA: fact or artefact?*, Trends in Microbiology **13**, pp. 212–220, 2005. Cited on page 31.

14 Gabriele Walker, *Snowball Earth – The Story of the Great Global Catastrophe That Spawned Life as We Know It*, Crown Publishing, 2003. No citations.

15 J. D. Rummel, J. H. Allton & D. Morrison, *A microbe on the moon? Surveyor III and lessons learned for future sample return missions*, preprint at www.lpi.usra.edu/meetings/sssr2011/pdf/5023.pdf. Cited on page 32.

16 The table and the evolutionary tree are taken from J. O. McInerney, M. Mullarkey, M. E. Wernecke & R. Powell, *Bacteria and archaea: molecular techniques reveal astonishing diversity*, Biodiversity **3**, pp. 3–10, 2002. The evolutionary tree might still change a little in the coming years. Cited on page 32.

17 The newest estimate is by R. Sender, S. Fuchs & R. Milo, *Revised estimates for the number of human and bacteria cells in the body*, PLOS Biology **14**, p. e1002533, 2016, free preprint at biorxiv.org/content/early/2016/01/06/036103. The first professional estimate was by E. Bianconi, A. Piovesan, F. Facchin, A. Beraudi, R. Casadei, F. Frabetti, L. Vitale, M. C. Pelleri, S. Tassani, F. Piva, S. Perez-Amodio, P. Strippoli & S. Canaider, *An estimation of the number of cells in the human body*, Annals of Human Biology **40**, pp. 463–471, 2013, also available for free online. A typical older and more optimistic estimate is E. K. Costello, C. L. Lauber, M. Hamady, N. Fierer, J. I. Gordon & R. Knight, *Bacterial community variation in human body habitats across space and time*, Science Express 5 November 2009. Cited on page 33.

18 E. Puttonen, C. Briese, G. Mandlburger, M. Wieser, M. Pfennigbauer, A. Zlinsky & N. Pfeifer, *Quantification of overnight movement of birch (Betula pendula) branches and foliage with short interval terrestrial laser scanning*, Frontiers in Plant Science 7, 2016, free download at journal.frontiersin.org. A video of the tree motion is also available there. Cited on page 37.

19 This is taken from the delightful children text Hans J. Press, *Spiel das Wissen schafft*, Ravensburger Buchverlag 1964, 2004. Cited on page 38.

20 The discovery of a specific taste for fat was published by F. Laugerette, P. Passilly-Degrace, B. Patris, I. Niot, M. Febbraio, J. P. Montmayeur & P. Besnard, *CD36 involvement in orosensory detection of dietary lipids, spontaneous fat preference, and digestive secretions*, Journal of Clinical Investigation **115**, pp. 3177–3184, 2005. Cited on page 40.

21 There is no standard procedure to learn to enjoy life to the maximum. A good foundation can be found in those books which teach the ability to those which have lost it.

The best experts are those who help others to overcome traumas. Peter A. Levine & Ann Frederick, *Waking the Tiger – Healing Trauma – The Innate Capacity to Transform Overwhelming Experiences*, North Atlantic Books, 1997. Geoff Graham,

How to Become the Parent You Never Had - a Treatment for Extremes of Fear, Anger and Guilt, Real Options Press, 1986. A good complement to these texts is the approach presented by BERT HELLINGER, *Zweierlei Glück*, Carl Auer Verlag, 1997. Some of his books are also available in English. The author presents a simple and efficient technique for reducing entanglement with one's family past. Another good book is PHIL STUTZ & BARRY MICHELS, *The Tools – Transform Your Problems into Courage, Confidence, and Creativity*, Random House, 2012.

The next step, namely full mastery in the enjoyment of life, can be found in any book written by somebody who has achieved mastery in any one topic. The topic itself is not important, only the passion is. A few examples:

A. DE LA GARANDERIE, *Le dialogue pédagogique avec l'élève*, Centurion, 1984, A. DE LA GARANDERIE, *Pour une pédagogie de l'intelligence*, Centurion, 1990, A. DE LA GARANDERIE, *Réussir ça s'apprend*, Bayard, 1994. De la Garanderie explains how the results of teaching and learning depend in particular on the importance of evocation, imagination and motivation.

PLATO, *Phaedrus*, Athens, 380 BCE.

FRANÇOISE DOLTO, *La cause des enfants*, Laffont, 1985, and her other books. Dolto (b. 1908 Paris, d. 1988 Paris), a child psychiatrist, is one of the world experts on the growth of the child; her main theme was that growth is only possible by giving the highest possible responsibility to every child during its development.

In the domain of art, many had the passion to achieve full pleasure. A good piece of music, a beautiful painting, an expressive statue or a good film can show it. On a smaller scale, the art to typeset beautiful books, so different from what many computer programs do by default, the best introduction are the works by Jan Tschichold (b. 1902 Leipzig, d. 1974 Locarno), the undisputed master of the field. Among the many books he designed are the beautiful Penguin books of the late 1940s; he also was a type designer, e.g. of the *Sabon* typeface. A beautiful summary of his views is the short but condensed text JAN TSCHICHOLD, *Ausgewählte Aufsätze über Fragen der Gestalt des Buches und der Typographie*, Birkhäuser Verlag, Basel, 1993. An extensive and beautiful textbook on the topic is HANS PETER WILLBERG & FRIEDRICH FORSSMAN, *Lesetypographie*, Verlag Hermann Schmidt, Mainz, 1997. See also ROBERT BRINGHURST, *The Elements of Typographic Style*, Hartley & Marks, 2004.

Many scientists passionately enjoyed their occupation. Any biography of Charles Darwin will purvey his fascination for biology, of Friedrich Bessel for astronomy, of Albert Einstein for physics and of Linus Pauling for chemistry. Cited on page 41.

22 The group of John Wearden in Manchester has shown by experiments with humans that the accuracy of a few per cent is possible for any action with a duration between a tenth of a second and a minute. See J. MCCRONE, *When a second lasts forever*, New Scientist pp. 53–56, 1 November 1997. Cited on page 42.

23 The chemical clocks in our body are described in JOHN D. PALMER, *The Living Clock*, Oxford University Press, 2002, or in A. AHLGREN & F. HALBERG, *Cycles of Nature: An Introduction to Biological Rhythms*, National Science Teachers Association, 1990. See also the www.msi.umn.edu/~halberg/introd website. Cited on page 42.

24 D.J MORRÉ & al., *Biochemical basis for the biological clock*, Biochemistry **41**, pp. 11941–11945, 2002. Cited on page 42.

25 An introduction to the sense of time as result of clocks in the brain is found in R. B. IVRY & R. SPENCER, *The neural representation of time*, Current Opinion in Neurobiology **14**, pp. 225–232, 2004. The interval timer is explain in simple words in K. WRIGHT, *Times in our lives*, Scientific American pp. 40–47, September 2002. The MRI research used is

S. M. Rao, A. R. Mayer & D. L. Harrington, *The evolution of brain activation during temporal processing*, Nature Neuroscience **4**, pp. 317–323, 2001. Cited on page 44.

26 See, for example, Jan Hilgevoord, *Time in quantum mechanics*, American Journal of Physics **70**, pp. 301–306, 2002. Cited on page 44.

27 E. J. Zimmerman, *The macroscopic nature of space-time*, American Journal of Physics **30**, pp. 97–105, 1962. Cited on page 45.

28 See P.D. Peşić, *The smallest clock*, European Journal of Physics **14**, pp. 90–92, 1993. Cited on page 46.

29 The possibilities for precision timing using single-ion clocks are shown in W.H. Oskay & al., *Single-atom clock with high accuracy*, Physical Review Letters **97**, p. 020801, 2006. Cited on page 46.

30 A pretty example of a quantum mechanical system showing exponential behaviour at all times is given by H. Nakazato, M. Namiki & S. Pascazio, *Exponential behaviour of a quantum system in a macroscopic medium*, Physical Review Letters **73**, pp. 1063–1066, 1994. Cited on page 48.

31 See the delightful book about the topic by Paolo Facchi & Saverio Pascazio, *La regola d'oro di Fermi*, Bibliopolis, 1999. An experiment observing deviations at short times is S.R. Wilkinson, C.F. Bharucha, M.C. Fischer, K.W. Madison, P.R. Morrow, Q. Niu, B. Sundaram & M.G. Raizen, Nature **387**, p. 575, 1997. Cited on page 48.

32 See, for example, R. Efron, *The duration of the present*, Annals of the New York Academy of Sciences **138**, pp. 713–729, 1967. Cited on page 49.

33 W.M. Itano, D.J. Heinzen, J.J. Bollinger & D.J. Wineland, *Quantum Zeno effect*, Physical Review A **41**, pp. 2295–2300, 1990. M.C. Fischer, B. Gutiérrez-Medina & M.G. Raizen, *Observation of the Quantum Zeno and Anti-Zeno effects in an unstable system*, Physical Review Letters **87**, p. 040402, 2001, also www-arxiv.org/abs/quant-ph/0104035. Cited on page 50.

34 See P. Facchi, Z. Hradil, G. Krenn, S. Pascazio & J. Řeháček *Quantum Zeno tomography*, Physical Review A **66**, p. 012110, 2002. Cited on page 50.

35 See P. Facchi, H. Nakazato & S. Pascazio *From the quantum Zeno to the inverse quantum Zeno effect*, Physical Review Letters **86**, pp. 2699–2702, 2001. Cited on page 51.

36 H. Kobayashi & S. Kohshima, *Unique morphology of the human eye*, Nature **387**, pp. 767–768, 1997. No citations.

37 James W. Prescott, *Body pleasure and the origins of violence*, The Futurist Bethseda, 1975, also available at www.violence.de/prescott/bullettin/article.html. Cited on page 54.

38 Frances Ashcroft, *The Spark of Life: Electricity in the Human Body*, Allen Lane, 2012. Cited on page 54.

39 Felix Tretter & Margot Albus, *Einführung in die Psychopharmakotherapie – Grundlagen, Praxis, Anwendungen*, Thieme, 2004. Cited on page 54.

40 See the talk on these experiments by Helen Fisher on www.ted.org and the information on helenfisher.com. Cited on page 55.

41 See for example P. Pyykkö, *Relativity, gold, closed-shell interactions, and CsAu.NH3*, Angewandte Chemie, International Edition **41**, pp. 3573–3578, 2002, or L. J. Norrby, *Why is mercury liquid? Or, why do relativistic effects not get into chemistry textbooks?*, Journal of Chemical Education **68**, pp. 110–113, 1991. Cited on page 58.

42 On the internet, the 'spherical' periodic table is credited to Timothy Stowe; but there is no reference for that claim, except an obscure calendar from a small chemical company. The original table (containing a number errors) used to be found at the chemlab.pc.maricopa.edu/periodic/stowetable.html website; it is now best found by searching for images called 'stowetable' with any internet search engine. Cited on page 59.

43 For good figures of atomic orbitals, take any modern chemistry text. Or go to csi.chemie.tu-darmstadt.de/ak/immel/. Cited on page 60.

44 For experimentally determined pictures of the orbitals of dangling bonds, see for example F. Giessibl & al., *Subatomic features on the silicon (111)-(7x7) surface observed by atomic force microscopy*, Science **289**, pp. 422–425, 2000. Cited on page 60.

45 L. Gagliardi & B. O. Roos, *Quantum chemical calculations show that the uranium molecule U_2 has a quintuple bond*, Nature **433**, pp. 848–851, 2005. B. O. Roos, A. C. Borin & L. Gagliardi, *Reaching the maximum multiplicity of the covalent chemical bond*, Angewandte Chemie, International Edition **46**, pp. 1469–1472, 2007. Cited on page 62.

46 H. -W. Fink & C. Escher, *Zupfen am Lebensfaden – Experimente mit einzelnen DNS-Molekülen*, Physik in unserer Zeit **38**, pp. 190–196, 2007. Cited on page 62.

47 This type of atomic bond became well-known through the introduction by D. Kleppner, *The most tenuous of molecules*, Physics Today **48**, pp. 11–12, 1995. Cited on page 66.

48 Exploring the uses of physics and chemistry in forensic science is fascinating. For a beautiful introduction to this field with many stories and a lot of physics, see the book by Patrick Voss-de Haan, *Physik auf der Spur*, Wiley-VCH, 2005. Cited on page 67.

49 See, for example, the extensive explanations by Rafal Swiecki on his informatvie website www.minelinks.com. Cited on page 69.

50 T. Gu, M. Li, C. McCammon & K. K. M. Lee, *Redox-induced lower mantle density contrast and effect on mantle structure and primitive oxygen*, Nature Geoscience **9**, pp. 723–727, 2016. Cited on page 71.

51 See the website by Tom Hales on www.math.lsa.umich.edu/~hales/countdown. An earlier book on the issue is the delightful text by Max Leppmaier, *Kugelpackungen von Kepler bis heute*, Vieweg Verlag, 1997. Cited on page 71.

52 For a short overview, also covering binary systems, see C. Bechinger, H. - H. von Grünberg & P. Leiderer, *Entropische Kräfte - warum sich repulsiv wechselwirkende Teilchen anziehen können*, Physikalische Blätter **55**, pp. 53–56, 1999. Cited on page 73.

53 H. -W. Fink & G. Ehrlich, *Direct observation of three-body interactions in adsorbed layers: Re on W(110)*, Physical Review Letters **52**, pp. 1532–1534, 1984, and H. -W. Fink & G. Ehrlich, *Pair and trio interactions between adatoms: Re on W(110)*, Journal of Chemical Physics **61**, pp. 4657–4665, 1984. Cited on pages 73 and 74.

54 See for example the textbook by A. Pimpinelli & J. Villain, *Physics of Crystal Growth*, Cambridge University Press, 1998. Cited on page 74.

55 Y. Furukawa, *Faszination der Schneekristalle - wie ihre bezaubernden Formen entstehen*, Chemie in unserer Zeit **31**, pp. 58–65, 1997. His website www.lowtem.hokudai.ac.jp/~frkw/index_e.html gives more information on the topic of snow crystals. Cited on page 74.

56 L. Bindi, P. J. Steinhardt, N. Yai & P. J. Lu, *Natural Quasicrystal*, Science **324**, pp. 1306–1309, 2009. Cited on page 81.

57 The present attempts to build cheap THz wave sensors – which allow seeing through clothes – is described by D. Clery, *Brainstorming their way to an imaging revolution*, Science **297**, pp. 761–763, 2002. Cited on page 84.

58 The switchable mirror effect was discovered by J. N. Huiberts, R. Griessen, J. H. Rector, R. J. Wijngarden, J. P. Dekker, D. G. de Groot & N. J. Koeman, *Yttrium and lanthanum hydride films with switchable optical properties*, Nature **380**, pp. 231–234, 1996. A good introduction is R. Griessen, *Schaltbare Spiegel aus Metallhydriden*, Physikalische Blätter **53**, pp. 1207–1209, 1997. Cited on page 85.

59 V. F. Weisskopf, *Of atoms, mountains and stars: a study in qualitative physics*, Science **187**, p. 605, 1975. Cited on page 87.

60 K. Schwab, E. A. Henriksen, J. M. Worlock & M. L. Roukes, *Measurement of the quantum of thermal conductance*, Nature **404**, pp. 974–977, 2000. Cited on page 90.

61 K. Autumn, Y. Liang, T. Hsich, W. Zwaxh, W. P. Chan, T. Kenny, R. Fearing & R. J. Full, *Adhesive force of a single gecko foot-hair*, Nature **405**, pp. 681–685, 2000. Cited on page 90.

62 A. B. Kesel, A. Martin & T. Seidl, *Getting a grip on spider attachment: an AFM approach to microstructure adhesion in arthropods*, Smart Materials and Structures **13**, pp. 512–518, 2004. Cited on page 90.

63 See the article on www.bio-pro.de/magazin/wissenschaft/archiv_2005/index.html?lang=en&artikelid=/artikel/03049/index.html. Cited on page 90.

64 See the beautiful article by R. Ritchie, M. J. Buehler & P. Hansma, *Plasticity and toughness in bones*, Physics Today **82**, pp. 41–47, 2009. See also the fascinating review articles P. Fratzl, *Von Knochen, Holz und Zähnen*, Physik Journal **1**, pp. 49–55, 2002, and P. Fratzl & R. Weinkamer, *Nature's hierarchical materials*, Progress in Material Science **52**, pp. 1263–1334, 2007. Cited on page 91.

65 H. Inaba, T. Saitou, K.-I. Tozaki & H. Hayashi, *Effect of the magnetic field on the melting transition of H2O and D2O measured by a high resolution and supersensitive differential scanning calorimeter*, Journal of Applied Physics **96**, pp. 6127–6132, 2004. Cited on page 91.

66 The graph for temperature is taken from J. Jouzel & al., *Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years*, Science **317**, pp. 793–796, 2007. The graph for CO_2 is combined from six publications: D.M. Etheridge & al., *Natural and anthropogenic changes in atmospheric* CO_2 *over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firm*, Journal of Geophysical Research **101**, pp. 4115–4128, 1996, J.R. Petit & al., *Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica*, Nature **399**, pp. 429–436, 1999, A. Indermühle & al., *Atmospheric* CO_2 *concentration from 60 to 20 kyr BP from the Taylor Dome ic cores, Antarctica*, Geophysical Research Letters **27**, pp. 735–738, 2000, E. Monnin & al., *Atmospheric* CO_2 *concentration over the last glacial termination*, Science **291**, pp. 112–114, 2001, U. Siegenthaler & al., *Stable carbon cycle-climate relationship during the late pleistocene*, Science **310**, pp. 1313–1317, 2005, D. Lüthi & al., *High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present*, Nature **453**, pp. 379–382, 2008. Cited on page 91.

67 H. Oerlemans, *De afkoeling van de aarde*, Nederlands tijdschrift voor natuurkunde pp. 230–234, 2004. This excellent paper by one of the experts of the field also explains that the Earth has two states, namely today's *tropical* state and the *snowball* state, when it is covered with ice. And there is hysteresis for the switch between the two states. Cited on page 93.

68 R. Hemley & al., presented these results at the International Conference on New Diamond Science in Tsukuba (Japan) 2005. See figures at www.carnegieinstitution.org/diamond-13may2005. Cited on page 93.

69 Ingo Dierking, *Textures of Liquid Crystals*, Wiley-VCH, 2003. Cited on page 95.

70 The *photon hall effect* was discovered by Geert Rikken, Bart van Tiggelen & Anja Sparenberg, *Lichtverstrooiing in een magneetveld*, Nederlands tijdschrift voor natuurkunde **63**, pp. 67–70, maart 1998. Cited on page 96.

71 C. Strohm, G. L. J. A. Rikken & P. Wyder, *Phenomenological evidence for the phonon Hall effect*, Physical Review Letters **95**, p. 155901, 2005. Cited on page 97.

72 E. Chibowski, L. Holysz, K. Terpilowski, *Effect of magnetic field on deposition and adhesion of calcium carbonate particles on different substrates*, Journal of Adhesion Science and Technology **17**, pp. 2005–2021, 2003, and references therein. Cited on page 97.

73 K. S. Novoselov, D. Jiang, F. Schedin, T. Booth, V. V. Khotkevich, S. V. Morozov & A. K. Geim, *Two Dimensional Atomic Crystals*, Proceedings of the National Academy of Sciences **102**, pp. 10451–10453, 2005. See also the talk by Andre Geim, *QED in a pencil trace*, to be downloaded at online.kitp.ucsb.edu/online/graphene_m07/geim/ or A. C. Neto, F. Guinea & N. M. Peres, *Drawing conclusions from graphene*, Physics World November 2006. Cited on pages 97, 98, and 414.

74 R.R. Nair & al., *Fine structure constant defines visual transparency of graphene*, Science **320**, p. 1308, 2008. Cited on page 99.

75 The first paper was J. Bardeen, L. N. Cooper & J. R. Schrieffer, *Microscopic Theory of Superconductivity*, Physical Review **106**, pp. 162–164, 1957. The full, so-called BCS theory, is then given in the masterly paper J. Bardeen, L. N. Cooper & J. R. Schrieffer, *Theory of Superconductivity*, Physical Review **108**, pp. 1175–1204, 1957. Cited on page 103.

76 A. P. Finne, T. Araki, R. Blaauwgeers, V. B. Eltsov, N. B. Kopnin, M. Krusius, L. Skrbek, M. Tsubota & G. E. Volovik, *An intrinsic velocity-independent criterion for superfluid turbulence*, Nature **424**, pp. 1022–1025, 2003. Cited on page 105.

77 The original prediction, which earned Laughlin a Nobel Prize in Physics, is in R. B. Laughlin, *Anomalous quantum Hall effect: an incompressible quantum fluid with fractionally charged excitations*, Physical Review Letters **50**, pp. 1395–1398, 1983. Cited on pages 105 and 107.

78 The first experimental evidence is by V. J. Goldman & B. Su, *Resonance tunnelling in the fractional quantum Hall regime: measurement of fractional charge*, Science **267**, pp. 1010–1012, 1995. The first unambiguous measurements are by R. de Picciotto & al., *Direct observation of a fractional charge*, Nature **389**, pp. 162–164, 1997, and L. Saminadayar, D. C. Glattli, Y. Jin & B. Etienne, *Observation of the e,3 fractionally charged Laughlin quasiparticle/* Physical Review Letters **79**, pp. 2526–2529, 1997. or arxiv.org/abs/cond-mat/9706307. Cited on page 105.

79 The discovery of the original quantum Hall effect, which earned von Klitzing the Nobel Prize in Physics, was published as K. von Klitzing, G. Dorda & M. Pepper, *New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantised Hall resistance*, Physical Review Letters **45**, pp. 494–497, 1980. Cited on page 105.

80 The fractional quantum Hall effect was discovered by D. C. Tsui, H. L. Stormer & A. C. Gossard, *Two-dimensional magnetotransport in the extreme quantum limit*,

Physical Review Letters **48**, pp. 1559–1562, 1982. Tsui and Stormer won the Nobel Prize in Physics with this paper. Cited on page 107.

81 K. S. Novoselov, Z. Jiang, Y. Zhang, S. V. Morozov, H. L. Stormer, U. Zeitler, J. C. Mann, G. S. Boebinger, P. Kim & A. K. Geim, *Room-temperature quantum Hall effect in graphene*, Science **315**, p. 1379, 2007. Cited on page 107.

82 See for example the overview by M. Born & T. Jüstel, *Umweltfreundliche Lichtquellen*, Physik Journal **2**, pp. 43–49, 2003. Cited on page 108.

83 K. An, J. J. Childs, R. R. Desari & M. S. Field, *Microlaser: a laser with one atom in an optical resonator*, Physical Review Letters **73**, pp. 3375–3378, 19 December 1994. Cited on page 114.

84 J. Kasparian, *Les lasers femtosecondes : applications atmosphériques*, La Recherche pp. RE14 1–7, February 2004/ See also the www.teramobile.org website. Cited on page 115.

85 A. Takita, H. Yamamoto, Y. Hayasaki, N. Nishida & H. Misawa, *Three-dimensional optical memory using a human fingernail*, Optics Express **13**, pp. 4560–4567, 2005. They used a Ti:sapphire oscillator and a Ti:sapphire amplifier. Cited on page 115.

86 The author predicted laser umbrellas in 2011. Cited on page 115.

87 W. Guo & H. Maris, *Observations of the motion of single electrons in liquid helium*, Journal of Low Temperature Physics **148**, pp. 199–206, 2007. Cited on page 117.

88 The story is found on many places in the internet. Cited on page 119.

89 S. L. Boersma, *Aantrekkende kracht tussen schepen*, Nederlands tidschrift voor natuuurkunde **67**, pp. 244–246, Augustus 2001. See also his paper S. L. Boersma, *A maritime analogy of the Casimir effect*, American Journal of Physics **64**, pp. 539–541, 1996. Cited on page 122.

90 P. Ball, *Popular physics myth is all at sea – does the ghostly Casimir effect really cause ships to attract each other?*, online at www.nature.com/news/2006/060501/full/news060501-7.html. Cited on pages 122 and 125.

91 A. Larraza & B. Denardo, *An acoustic Casimir effect*, Physics Letters A **248**, pp. 151–155, 1998. See also A. Larraza, *A demonstration apparatus for an acoustic analog of the Casimir effect*, American Journal of Physics **67**, pp. 1028–1030, 1999. Cited on page 124.

92 H. B. G. Casimir, *On the attraction between two perfectly conducting bodies*, Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen **51**, pp. 793–795, 1948. Cited on page 124.

93 H. B. G. Casimir & D. Polder, *The influence of retardation on the London–Van der Waals forces*, Physical Review **73**, pp. 360–372, 1948. Cited on page 124.

94 B. W. Derjaguin, I. I. Abrikosova & E. M. Lifshitz, *Direct measurement of molecular attraction between solids separated by a narrow gap*, Quaterly Review of the Chemical Society (London) **10**, pp. 295–329, 1956. Cited on page 124.

95 M. J. Sparnaay, *Attractive forces between flat plates*, Nature **180**, pp. 334–335, 1957. M. J. Sparnaay, *Measurements of attractive forces between flat plates*, Physica (Utrecht) **24**, pp. 751–764, 1958. Cited on page 125.

96 S. K. Lamoreaux, *Demonstration of the Casimir force in the 0.6 to 6 µm range*, Physical Review Letters **78**, pp. 5–8, 1997. U. Mohideen & A. Roy, *Precision measurement of the Casimir force from 0.1 to 0.9 µm*, Physical Review Letters **81**, pp. 4549–4552, 1998. Cited on page 125.

97 A. Lambrecht, *Das Vakuum kommt zu Kräften*, Physik in unserer Zeit **36**, pp. 85–91, 2005. Cited on page 125.

98 T. H. Boyer, *Van der Waals forces and zero-point energy for dielectric and permeable materials*, Physical Review A **9**, pp. 2078–2084, 1974. This was taken up again in O. Kenneth, I. Klich, A. Mann & M. Revzen, *Repulsive Casimir forces*, Physical Review Letters **89**, p. 033001, 2002. However, none of these effects has been verified yet. Cited on page 125.

99 The effect was discovered by K. Scharnhorst, *On propagation of light in the vacuum between plates*, Physics Letters B **236**, pp. 354–359, 1990. See also G. Barton, *Faster-than-c light between parallel mirrors: the Scharnhorst effect rederived*, Physics Letters B **237**, pp. 559–562, 1990, and P. W. Milonni & K. Svozil, *Impossibility of measuring faster-than-c signalling by the Scharnhorst effect*, Physics Letters B **248**, pp. 437–438, 1990. The latter corrects an error in the first paper. Cited on page 125.

100 D.L. Burke & al., *Positron production in multiphoton light-by-light scattering*, Physical Review Letters **79**, pp. 1626–1629, 1997. A simple summary is given in Bertram Schwarzschild, *Gamma rays create matter just by plowing into laser light*, Physics Today **51**, pp. 17–18, February 1998. Cited on page 130.

101 M. Kardar & R. Golestanian, *The 'friction' of the vacuum, and other fluctuation-induced forces*, Reviews of Modern Physics **71**, pp. 1233–1245, 1999. Cited on page 131.

102 G. Gour & L. Sriramkumar, *Will small particles exhibit Brownian motion in the quantum vacuum?*, arxiv.org/abs/quant/phys/9808032 Cited on page 131.

103 P. A. M. Dirac, *The requirements of fundamental physical theory*, European Journal of Physics **5**, pp. 65–67, 1984. This article transcribes a speech by Paul Dirac just before his death. Disturbed by the infinities of quantum electrodynamics, he rejects as wrong the theory which he himself found, even though it correctly describes all experiments. The humility of a great man who is so dismissive of his main and great achievement was impressive when hearing him, and still is impressive when reading the talk. Cited on page 132.

104 H. Euler & B. Kockel, Naturwissenschaften **23**, p. 246, 1935, H. Euler, Annalen der Physik **26**, p. 398, 1936, W. Heisenberg & H. Euler, *Folgerung aus der Diracschen Theorie des Electrons*, Zeitschrift für Physik **98**, pp. 714–722, 1936. Cited on page 133.

105 Th. Stoehlker & al., *The 1s Lamb shift in hydrogenlike uranium measured on cooled, decelerated ions beams*, Physical Review Letters **85**, p. 3109, 2000. Cited on page 133.

106 M. Roberts & al., *Observation of an electric octupole transition in a single ion*, Physical Review Letters **78**, pp. 1876–1879, 1997. A lifetime of 3700 days was determined. Cited on page 133.

107 See the instructive paper by J. Mlyńczak, J. Kubicki & K. Kopczyński *Stand-off detection of alcohol in car cabins*, Journal of Applied Remote Sensing **8**, p. 083627, 2014. Cited on page 120.

108 The fluid helium based quantum gyroscope was first used to measure the rotation of the Earth by the French research group O. Avenel & E. Varoquaux, *Detection of the Earth rotation with a superfluid double-hole resonator*, Czechoslovak Journal of Physics (Supplement S6) **48**, pp. 3319–3320, 1996. The description of the set-up is found in Yu. Mukharsky, O. Avenel & E. Varoquaux, *Observation of half-quantum defects in superfluid* ^{3}He − B, Physical Review Letters **92**, p. 210402, 2004. The gyro experiment was later repeated by the Berkeley group, K. Schwab, N. Bruckner & R. E. Packard, *Detection of the Earth's rotation using superfluid phase coherence*, Nature **386**, pp. 585–587, 1997. For an review of this topic, see O. Avenel, Yu. Mukharsky & E. Varoquaux, *Superfluid gyrometers*, Journal of Low Temperature Physics **135**, p. 745, 2004. Cited on page 120.

109 K. Schwab, E. A. Henriksen, J. M. Worlock & M. L. Roukes, *Measurement of the quantum of thermal conductance*, Nature **404**, p. 974, 2000. For the optical analog of the experiment, see the beautiful paper by E. A. Montie, E. C. Cosman, G. W. 't Hooft, M. B. van der Mark & C. W. J. Beenakker, *Observation of the optical analogue of quantized conductance of a point contact*, Nature **350**, pp. 594–595, 18 April 1991, and the longer version E. A. Montie, E. C. Cosman, G. W. 't Hooft, M. B. van der Mark & C. W. J. Beenakker, *Observation of the optical analogue of the quantised conductance of a point contact*, Physica B **175**, pp. 149–152, 1991. For more details on this experiment, see the volume *Light, Charges and Brains* of the Motion Mountain series. Cited on page 133.

110 Research on how humans move is published in the journals Human Movement Science and also in Human Movement. Cited on page 137.

111 See, for example, the paper by D. A. Bryant, *Electron acceleration in the aurora*, Contemporary Physics **35**, pp. 165–179, 1994. A recent development is D. L. Chandler, *Mysterious electron acceleration explained*, found at web.mit.edu/newsoffice/2012/plasma-phenomenon-explained-0227.html; it explains the results of the paper by J. Egedal, W. Daughton & A. Le, *Large-scale acceleration by parallel electric fields during magnetic reconnection*, Nature Physics 2012. Cited on page 137.

112 The is a recent research field; discharges above clouds are described, e.g., on www.spritesandjets.com and on en.wikipedia.org/wiki/Sprite_(lightning). See also eurosprite.blogspot.com. Cited on page 137.

113 About Coulomb explosions and their importance for material processing with lasers, see for example D. Müller, *Picosecond lasers for high-quality industrial micromachining*, Photonics Spectra pp. 46–47, November 2009. Cited on page 137.

114 See, e.g., L.O'C. Drury, *Acceleration of cosmic rays*, Contemporary Physics **35**, pp. 231–242, 1994. Cited on page 137.

115 See Dirk Kreimer, *New mathematical structures in renormalizable quantum field theories*, arxiv.org/abs/hep-th/0211136 or Annals of Physics **303**, pp. 179–202, 2003, and the erratum ibid., **305**, p. 79, 2003. Cited on page 137.

116 See, for example, the paper by M. Urban, *A particle mechanism for the index of refraction*, preprint at arxiv.org/abs/0709.1550. Cited on page 138.

117 S. Fray, C. Alvarez Diez, T. W. Hänsch & M. Weitz, *Atomic interferometer with amplitude gratings of light and its applications to atom based tests of the equivalence principle*, Physical Review Letters **93**, p. 240404, 2004, preprint at arxiv.org/abs/physics/0411052. The idea for the experiment is old and can be traced back to the proposal, made in the 1950s, to build an atomic fountain. Cited on page 140.

118 The original papers on neutron behaviour in the gravitational field are all worth reading. The original feat was reported in V. V. Nesvizhevsky, H. G. Boerner, A. K. Petoukhov, H. Abele, S. Baessler, F. Ruess, Th. Stoeferle, A. Westphal, A. M. Gagarski, G. A. Petrov & A. V. Strelkov, *Quantum states of neutrons in the Earth's gravitational field*, Nature **415**, pp. 297–299, 17 January 2002. Longer explanations are found in V. V. Nesvizhevsky, H. G. Boerner, A. M. Gagarsky, A. K. Petoukhov, G. A. Petrov, H. Abele, S. Baessler, G. Divkovic, F. J. Ruess, Th. Stoeferle, A. Westphal, A. V. Strelkov, K. V. Protasov & A. Yu. Voronin, *Measurement of quantum states of neutrons in the Earth's gravitational field*, Physical Review D **67**, p. 102002, 2003, preprint at arxiv.org/abs/hep-ph/0306198, and in V. V. Nesvizhevsky, A. K. Petukhov, H. G. Boerner,

T. A. Baranova, A. M. Gagarski, G. A. Petrov, K. V. Protasov, A. Yu. Voronin, S. Baessler, H. Abele, A. Westphal & L. Lucovac, *Study of the neutron quantum states in the gravity field*, European Physical Journal C **40**, pp. 479–491, 2005, preprint at arxiv.org/abs/hep-ph/0502081 and A. Yu. Voronin, H. Abele, S. Baessler, V. V. Nesvizhevsky, A. K. Petukhov, K. V. Protasov & A. Westphal, *Quantum motion of a neutron in a wave-guide in the gravitational field*, Physical Review D **73**, p. 044029, 2006, preprint at arxiv.org/abs/quant-ph/0512129. Cited on page 141.

119 H. Rauch, W. Treimer & U. Bonse, *Test of a single crystal neutron interferometer*, Physics Letters A **47**, pp. 369–371, 1974. Cited on page 142.

120 R. Colella, A. W. Overhauser & S. A. Werner, *Observation of gravitationally induced quantum mechanics*, Physical Review Letters **34**, pp. 1472–1475, 1975. This experiment is usually called the cow experiment. Cited on page 142.

121 Ch. J. Bordé & C. Lämmerzahl, *Atominterferometrie und Gravitation*, Physikalische Blätter **52**, pp. 238–240, 1996. See also A. Peters, K. Y. Chung & S. Chu, *Observation of gravitational acceleration by dropping atoms*, Nature **400**, pp. 849–852, 26 August 1999. Cited on page 142.

122 J. D. Bekenstein, *Black holes and entropy*, Physical Review D **7**, pp. 2333–2346, 1973. Cited on page 145.

123 R. Bousso, *The holographic principle*, Review of Modern Physics **74**, pp. 825–874, 2002, also available as arxiv.org/abs/hep-th/0203101. The paper is an excellent review; however, it has some argumentation errors, as explained on Trang 146. Cited on page 146.

124 This is clearly argued by S. Carlip, *Black hole entropy from horizon conformal field theory*, Nuclear Physics B Proceedings Supplement **88**, pp. 10–16, 2000. Cited on page 146.

125 S. A. Fulling, *Nonuniqueness of canonical field quantization in Riemannian space-time*, Physical Review D **7**, pp. 2850–2862, 1973, P. Davies, *Scalar particle production in Schwarzchild and Rindler metrics*, Journal of Physics A: General Physics **8**, pp. 609–616, 1975, W. G. Unruh, *Notes on black hole evaporation*, Physical Review D **14**, pp. 870–892, 1976. Cited on page 146.

126 About the possibility to measure Fulling–Davies–Unruh radiation directly, see for example the paper by H. Rosu, *On the estimates to measure Hawking effect und Unruh effect in the laboratory*, International Journal of Modern Physics D3 p. 545, 1994. arxiv.org/abs/gr-qc/9605032 or the paper P. Chen & T. Tajima, *Testing Unruh radiation with ultra-intense lasers*, Physical Review Letters **83**, pp. 256–259, 1999. Cited on page 147.

127 E. T. Akhmedov & D. Singleton, *On the relation between Unruh and Sokolov–Ternov effects*, preprint at arxiv.org/abs/hep-ph/0610391; see also E. T. Akhmedov & D. Singleton, *On the physical meaning of the Unruh effect*, preprint at arxiv.org/abs/0705.2525. Unfortunately, as Bell and Leinaas mention, the Sokolov–Ternov effect cannot be used to confirm the expression of the black hole entropy, because the radiation is not thermal, and so a temperature of the radiation is hard to define. Nevertheless, C. Schiller predicts (October 2009) that careful analysis of the spectrum could be used (1) to check the proportionality of entropy and area in black holes, and (2) to check the transformation of temperature in special relativity. Cited on page 147.

128 W. G. Unruh & R. M. Wald, *Acceleration radiation and the generalised second law of thermodynamics*, Physical Review D **25**, pp. 942–958 , 1982. Cited on page 148.

129 R. M. Wald, *The thermodynamics of black holes*, Living Reviews of Relativity 2001, www-livingreviews.org/lrr-2001-6. Cited on page 149.

130 For example, if neutrinos were massless, they would be emitted by black holes more frequently than photons. For a delightful popular account from a black hole expert, see Igor Novikov, *Black Holes and the Universe*, Cambridge University Press 1990. Cited on pages 150 and 154.

131 The original paper is W. G. Unruh, *Experimental black hole evaporation?*, Physical Review Letters **46**, pp. 1351–1353, 1981. A good explanation with good literature overview is the one by Matt Visser, *Acoustical black holes: horizons, ergospheres and Hawking radiation*, arxiv.org/abs/gr-qc/9712010. Cited on page 151.

132 Optical black holes are explored in W. G. Unruh & R. Schützhold, *On slow light as a black hole analogue*, Physical Review D **68**, p. 024008, 2003, preprint at arxiv.org/abs/gr-qc/0303028. Cited on page 151.

133 T. Damour & R. Ruffini, *Quantum electrodynamical effects in Kerr–Newman geometries*, Physical Review Letters **35**, pp. 463–466, 1975. Cited on page 153.

134 These were the Vela satellites; their existence and results were announced officially only in 1974, even though they were working already for many years. Cited on page 151.

135 An excellent general introduction into the topic of gamma ray bursts is S. Klose, J. Greiner & D. Hartmann, *Kosmische Gammastrahlenausbrüche – Beobachtungen und Modelle*, Teil I und II, Sterne und Weltraum March and April 2001. Cited on pages 152 and 153.

136 When the gamma-ray burst encounters the matter around the black hole, it is broadened. The larger the amount of matter, the broader the pulse is. See G. Preparata, R. Ruffini & S.-S. Xue, *The dyadosphere of black holes and gamma-ray bursts*, Astronomy and Astrophysics **338**, pp. L87–L90, 1998, R. Ruffini, J. D. Salmonson, J. R. Wilson & S.-S. Xue, *On the pair electromagnetic pulse of a black hole with electromagnetic structure*, Astronomy and Astrophysics **350**, pp. 334–343, 1999, R. Ruffini, J. D. Salmonson, J. R. Wilson & S.-S. Xue, *On the pair electromagnetic pulse from an electromagnetic black hole surrounded by a baryonic remnant*, Astronomy and Astrophysics **359**, pp. 855–864, 2000, and C. L. Bianco, R. Ruffini & S.-S. Xue, *The elementary spike produced by a pure e^+e^- pair-electromagnetic pulse from a black hole: the PEM pulse*, Astronomy and Astrophysics **368**, pp. 377–390, 2001. For a very personal account by Ruffini on his involvement in gamma-ray bursts, see his paper *Black hole formation and gamma ray bursts*, arxiv.org/abs/astro-ph/0001425. Cited on page 153.

137 See the publication by D.W. Fox & al., *Early optical emission from the γ-ray burst of 4 October 2002*, Nature **422**, pp. 284–286, 2003. See also arxiv.org/abs/astro-ph/0301377, arxiv.org/abs/astro-ph/0301262 and arxiv.org/abs/astro-ph/0303539. Cited on page 152.

138 Negative heat capacity has also been found in atom clusters and in nuclei. See, e.g., M. Schmidt & al., *Negative heat capacity for a cluster of 147 sodium atoms*, Physical Review Letters **86**, pp. 1191–1194, 2001. Cited on page 154.

139 H.-P. Nollert, *Quasinormal modes: the characteristic 'sound' of black holes and neutron stars*, Classical and Quantum Gravity **16**, pp. R159–R216, 1999. Cited on page 154.

140 On the membrane description of black holes, see Kip S. Thorne, Richard H. Price & Douglas A. MacDonald, editors, *Black Holes: the Membrane Paradigm*, Yale University Press, 1986. Cited on page 154.

141 Page wrote a series of papers on the topic; a beautiful summary is Don N. Page, *How fast does a black hole radiate information?*, International Journal of Modern Physics **3**, pp. 93–106, 1994, which is based on his earlier papers, such as *Information in black hole radiation*,

Physical Review Letters **71**, pp. 3743–3746, 1993. See also his preprint at arxiv.org/abs/hep-th/9305040. Cited on page 155.

142 See Don N. Page, *Average entropy of a subsystem*, Physical Review Letters **71**, pp. 1291–1294, 1993. The entropy formula of this paper, used above, was proven by S. K. Foong & S. Kanno, *Proof of Page's conjecture on the average entropy of a subsystem*, Physical Review Letters **72**, pp. 1148–1151, 1994. Cited on page 156.

143 R. Lafrance & R. C. Myers, *Gravity's rainbow: limits for the applicability of the equivalence principle*, Physical Review D **51**, pp. 2584–2590, 1995, arxiv.org/abs/hep-th/9411018. Cited on page 157.

144 M. Yu. Kuchiev & V. V. Flambaum, *Scattering of scalar particles by a black hole*, arxiv.org/abs/gr-qc/0312065. See also M. Yu. Kuchiev & V. V. Flambaum, *Reflection on event horizon and escape of particles from confinement inside black holes*, arxiv.org/abs/gr-qc/0407077. Cited on page 157.

145 See the widely cited but wrong paper by G. C. Ghirardi, A. Rimini & T. Weber, *Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems*, Physical Review D **34**, pp. 470–491, 1986. Cited on page 143.

146 I speculate that this version of the coincidences could be original; I have not found it in the literature. Cited on page 144.

147 Steven Weinberg, *Gravitation and Cosmology*, Wiley, 1972. See equation 16.4.3 on page 619 and also page 620. Cited on page 144.

148 It could be that knot theory provides a relation between a local knot invariant, related to particles, and a global one. Cited on page 144.

149 This point was made repeatedly by Steven Weinberg, namely in *Derivation of gauge invariance and the equivalence principle from Lorentz invariance of the S-matrix* , Physics Letters **9**, pp. 357–359, 1964, in *Photons and gravitons in S-matrix theory: derivation of charge conservation and equality of gravitational and inertial mass*, Physical Review B **135**, pp. 1049–1056, 1964, and in *Photons and gravitons in perturbation theory: derivation of Maxwell's and Einstein's equations*, Physical Review B **138**, pp. 988–1002, 1965. Cited on page 158.

150 E. Joos, *Why do we observe a classical space-time?*, Physics Letters A **116**, pp. 6–8, 1986. Cited on page 159.

151 L. H. Ford & T. A. Roman, *Quantum field theory constrains traversable wormhole geometries*, arxiv.org/abs/gr-qc/9510071 or Physical Review D **53**, pp. 5496–5507, 1996. Cited on page 159.

152 B. S. Kay, M. Radzikowski & R. M. Wald, *Quantum field theory on spacetimes with a compactly generated Cauchy horizon*, arxiv.org/abs/gr-qc/9603012 or Communications in Mathematical Physics 183 pp. 533–556, 1997. Cited on page 160.

153 M. J. Pfenning & L. H. Ford, *The unphysical nature of 'warp drive'*, Classical and Quantum Gravity **14**, pp. 1743–1751, 1997. Cited on page 160.

154 A excellent technical introduction to nuclear physics is Bogdan Povh, Klaus Rith, Christoph Scholz & Frank Zetsche, *Teilchen und Kerne*, Springer, 5th edition, 1999. It is also available in English translation. Cited on page 162.

155 For magnetic resonance imaging films of the heart beat, search for 'cardiac MRI' on the internet. See for example www.youtube.com/watch?v=58l6oFhfZU. Cited on page 164.

156 See the truly unique paper by C. Bamberg, G. Rademacher, F. Güttler, U. Teichgräber, M. Cremer, C. Bührer, C. Spies, L. Hinkson, W. Henrich,



HÌNH 190 Nguồn gốc huyền diệu của sự sống (© W.C.M. Weijmar Schultz).

K. D. KALACHE & J. W. DUDENHAUSEN, *Human birth observed in real-time open magnetic resonance imaging*, American Journal of Obstetrics & Gynecology **206**, p. 505e1-505e6, 2012. Cited on page 164.

157 W.C.M. WEIJMAR SCHULTZ & al., *Magnetic resonance imaging of male and female genitals during coitus and female sexual arousal*, British Medical Journal **319**, pp. 1596–1600, December 18, 1999, available online as www.bmj.com/cgi/content/full/319/7225/1596. Cited on page 164.

158 M. CHANTELL, T. C. WEEKES, X. SARAZIN & M. URBAN, *Antimatter and the moon*, Nature **367**, p. 25, 1994. M. AMENOMORI & al., *Cosmic ray shadow by the moon observed with the Tibet air shower array*, Proceedings of the 23rd International Cosmic Ray Conference, Calgary **4**, pp. 351–354, 1993. M. URBAN, P. FLEURY, R. LESTIENNE & F. PLOUIN, *Can we detect antimatter from other galaxies by the use of the Earth's magnetic field and the Moon as an absorber?*, Nuclear Physics, Proceedings Supplement **14B**, pp. 223–236, 1990. Cited on page 177.

159 JOSEPH MAGILL & JEAN GALY, *Radioactivity Radionuclides Radiation*, Springer, 2005. This dry but dense book contains most data about the topic, including much data on all the known nuclides. Cited on pages 181 and 198.

160 An good summary on radiometric dating is by R. WIENS, *Radiometric dating – a christian perpective*, www.asa3.org/ASA/resources/Wiens.html. The absurd title is due to the habit in many religious circles to put into question radiometric dating results. Putting apart the few religious statements in the review, the content is well explained. Cited on page 184.

161 See for example the excellent and free lecture notes by HEINZ-GÜNTHER STOSCH, *Einführung in die Isotopengeochemie*, 2004, available on the internet. Cited on page 182.

162 G. B. DALRYMPLE, *The age of the Earth in the twentieth century: a problem (mostly) solved*, Special Publications, Geological Society of London **190**, pp. 205–221, 2001. Cited on page 184.

163 A good overview is given by A. N. HALLIDAY, *Radioactivity, the discovery of time and the*

earliest history of the Earth, Contemporary Physics **38**, pp. 103–114, 1997. Cited on page 185.

164 J. Dudek, A. God, N. Schunck & M. Mikiewicz, *Nuclear tetrahedral symmetry: possibly present throughout the periodic table*, Physical Review Letters **88**, p. 252502, 24 June 2002. Cited on page 187.

165 A good introduction is R. Clark & B. Wodsworth, *A new spin on nuclei*, Physics World pp. 25–28, July 1998. Cited on page 187.

166 John Horgan, *The End of Science – Facing the Limits of Knowledge in the Twilight of the Scientific Age*, Broadway Books, 1997, chapter 3, note 1. Cited on page 191.

167 G. Charpak & R. L. Garwin, *The DARI*, Europhysics News **33**, pp. 14–17, January/February 2002. Cited on page 193.

168 M. Brunetti, S. Cecchini, M. Galli, G. Giovannini & A. Pagliarin, *Gamma-ray bursts of atmospheric origin in the MeV energy range*, Geophysical Research Letters **27**, p. 1599, 2000. Cited on page 195.

169 For a recent image of Lake Karachay, see www.google.com/maps/@55.6810205,60.796688,3519m/data=!3m1!1e3. Cited on page 196.

170 A book with nuclear explosion photographs is Michael Light, *100 Suns*, Jonathan Cape, 2003. Cited on page 197.

171 *A conversation with Peter Mansfield*, Europhysics Letters **37**, p. 26, 2006. Cited on page 193.

172 An older but still fascinating summary of solar physics is R. Kippenhahn, *Hundert Milliarden Sonnen*, Piper, 1980. It was a famous bestseller and is available also in English translation. Cited on page 201.

173 H. Bethe, *On the formation of deuterons by proton combination*, Physical Review **54**, pp. 862–862, 1938, and H. Bethe, *Energy production in stars*, Physical Review **55**, pp. 434–456, 1939. Cited on page 201.

174 M. Nauenberg & V. F. Weisskopf, *Why does the sun shine?*, American Journal of Physics **46**, pp. 23–31, 1978. Cited on page 203.

175 The slowness of the speed of light inside the Sun is due to the frequent scattering of photons by solar matter. The most serious estimate is by R. Mitalas & K. R. Sills, *On the photon diffusion time scale for the Sun*, The Astrophysical Journal **401**, pp. 759–760, 1992. They give a photon escape time of 0.17 Ma, an average photon free mean path of 0.9 mm and an average speed of 0.97 cm/s. See also the interesting paper by M. Stix, *On the time scale of energy transport in the sun*, Solar Physics **212**, pp. 3–6, 2003, which comes to the conclusion that the speed of energy transport is 30 Ma, two orders of magnitude higher than the photon diffusion time. Cited on page 204.

176 See the freely downloadable book by John Wesson, *The Science of JET - The Achievements of the Scientists and Engineers Who Worked on the Joint European Torus 1973-1999*, JET Joint Undertaking, 2000, available at www.jet.edfa.org/documents/wesson/wesson.html. Cited on page 212.

177 J. D. Lawson, *Some criteria for a power producing thermonuclear reactor*, Proceedings of the Physical Society, London **B 70**, pp. 6–10, 1957. The paper had been kept secret for two years. However, the result was already known, before Lawson, to all Russian nuclear physicists several years earlier. Cited on page 213.

178 The classic paper is R. A. Alpher, H. Bethe & G. Gamow, *The Origin of Chemical Elements*, Physical Review **73**, pp. 803–804, 1948. Cited on page 214.

179 The famous overview of nucleosyntehis, over 100 pages long, is the so-called B^2FH paper by M. Burbidge, G. Burbidge, W. Fowler & F. Hoyle, *Synthesis of the elements in stars*, Reviews of Modern Physics **29**, pp. 547–650, 1957. Cited on page 214.

180 The standard reference is E. Anders & N. Grevesse, *Abundances of the elements – meteoritic and solar*, Geochimica et Cosmochimica Acta **53**, pp. 197–214, 1989. Cited on page 216.

181 S. Goriely, A. Bauswein & H. T. Janka, *R-process nucleosynthesis in dynamically ejected matter of neutron star mergers*, Astrophysical Journal **738**, p. L38, 2011, preprint at arxiv.org/abs/1107.0899. Cited on pages 214 and 217.

182 Kendall, Friedman and Taylor received the 1990 Nobel Prize in Physics for a series of experiments they conducted in the years 1967 to 1973. The story is told in the three Nobel lectures R. E. Taylor, *Deep inelastic scattering: the early years*, Review of Modern Physics **63**, pp. 573–596, 1991, H. W. Kendall, *Deep inelastic scattering: Experiments on the proton and the observation of scaling*, Review of Modern Physics **63**, pp. 597–614, 1991, and J. I. Friedman, *Deep inelastic scattering: Comparisons with the quark model*, Review of Modern Physics **63**, pp. 615–620, 1991. Cited on page 220.

183 G. Zweig, *An SU3 model for strong interaction symmetry and its breaking II*, CERN Report No. 8419TH. 412, February 21, 1964. Cited on page 220.

184 About the strange genius of Gell-Mann, see the beautiful book by George Johnson, *Murray Gell-Mann and the Revolution in Twentieth-Century Physics*, Knopf, 1999. Cited on page 220.

185 The best introduction might be the wonderfully clear text by Donald H. Perkins, *Introduction to High Energy Physics*, Cambridge University Press, fourth edition, 2008. Also beautiful, with more emphasis on the history and more detail, is Kurt Gottfried & Victor F. Weisskopf, *Concepts of Particle Physics*, Clarendon Press, Oxford, 1984. Victor Weisskopf was one of the heroes of the field, both in theoretical research and in the management of CERN, the European organization for particle research. Cited on pages 222, 231, and 401.

186 The official reference for all particle data, worth a look for every physicist, is the massive collection of information compiled by the Particle Data Group, with the website pdg.web.cern.ch containing the most recent information. A printed review is published about every two years in one of the major journals on elementary particle physics. See for example C. Amsler & al., *The Review of Particle Physics*, Physics Letters B **667**, p. 1, 2008. For some measured properties of these particles, the official reference is the set of so-called CODATA values given in referenceXem 286. Cited on pages 222, 233, 234, 235, 236, 245, 251, 252, 255, and 262.

187 H. Fritsch, M. Gell-Mann & H. Leutwyler, *Advantages of the color octet picture*, Physics Letters B **47**, pp. 365–368, 1973. Cited on page 224.

188 Quantum chromodynamics can be explored in books of several levels. For the first, popular level, see the clear longseller by one of its founders, Harald Fritzsch, *Quarks – Urstoff unserer Welt*, Piper Verlag, 2006, or, in English language, *Quarks: the Stuff of Matter*, Penguin Books, 1983. At the second level, the field can be explored in texts on high energy physics, as those ofXem 185. The third level contains books like Kerson Huang, *Quarks, Leptons and Gauge Fields*, World Scientific, 1992, or Felix J. Ynduráin, *The Theory of Quark and Gluon Interactions*, Springer Verlag, 1992, or Walter Greiner & Andreas Schäfer, *Quantum Chromodynamics*, Springer Verlag, 1995, or the modern and detailed text by Stephan Narison, *QCD as a Theory of Hadrons*, Cambridge University Press, 2004. As always, a student has to discover by himself or herself which text is most valuable. Cited on pages 224, 231, and 233.

189 S. Dürr & al., *Ab initio determination of the light hadron masses*, Science **322**, pp. 1224–1227, 2008. Cited on page 229.

190 See for example C. Bernard & al., *Light hadron spectrum with Kogut–Susskind quarks*, Nuclear Physics, Proceedings Supplement 73, p. 198, 1999, and references therein. Cited on page 229.

191 R. Brandelik & al., *Evidence for planar events in e^+e^- annihilation at high energies*, Physics Letters B **86**, pp. 243–249, 1979. Cited on page 237.

192 For a pedagogical introduction to lattice QCD calculations, see R. Gupta, *Introduction to Lattice QCD*, preprint at arxiv.org/abs/hep-lat/9807028, or the clear introduction by Michael Creutz, *Quarks, Gluons and Lattices*, Cambridge University Press, 1983. Cited on page 232.

193 S. Bethke, *Experimental tests of asymptotic freedom*, Progress in Particle and Nuclear Physics **58**, pp. 351–368, 2007, preprint at arxiv.org/abs/hep-ex/0606035. Cited on page 232.

194 F. Abe & al., *Measurement of dijet angular distributions by the collider detector at Fermilab*, Physical Review Letters 77, pp. 5336–5341, 1996. Cited on page 233.

195 The approximation of QCD with zero mass quarks is described by F. Wilczek, *Getting its from bits*, Nature **397**, pp. 303–306, 1999. It is also explained in F. Wilczek, *Asymptotic freedom*, Nobel lecture 2004. The proton's mass is set by the energy scale at which the strong coupling, coming from its value at Planck energy, becomes of order unity. Cited on pages 234 and 258.

196 A. J. Buchmann & E. M. Henley, *Intrinsic quadrupole moment of the nucleon*, Physical Review C **63**, p. 015202, 2000. Alfons Buchmann also predicts that the quadrupole moment of the other, strange $J = 1/2$ octet baryons is positive, and predicts a prolate structure for all of them (private communication). For the decuplet baryons, with $J = 3/2$, the quadrupole moment can often be measured spectroscopically, and is always negative. The four Δ baryons are thus predicted to have a negative intrinsic quadrupole moment and thus an oblate shape. This explained in A. J. Buchmann & E. M. Henley, *Quadrupole moments of baryons*, Physical Review D **65**, p. 073017, 2002. For recent updates, see A. J. Buchmann, *Charge form factors and nucleon shape*, pp. 110–125, in the Shape of Hadrons Workshop Conference, Athens Greece, 27-29 April 2006, AIP Conference Proceedings 904, Eds. C.N. Papanicolas, Aron Bernstein. For updates on other baryons, see A. J. Buchmann, *Structure of strange baryons*, Hyp 2006, International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics, Oct.10-14, Mainz, Germany, to be published in European Physics Journal A 2007. The topic is an active field of research; for example, results on magnetic octupole moments are expected soon. Cited on page 235.

197 S. Strauch & al., *Polarization transfer in the ^{4}He (e,e'p) ^{3}H reaction up to $Q^2 = 2.6(GeV/c)^2$*, Physical Review Letters **91**, p. 052301, 2003. Cited on page 235.

198 F. Close, *Glueballs and hybrids: new states of matter*, Contemporary Physics **38**, pp. 1–12, 1997. See also the next reference. Cited on page 237.

199 A tetraquark is thought to be the best explanation for the $f_0(980)$ resonance at 980 MeV. The original proposal of this explanation is due to R. L. Jaffe, *Multiquark hadrons I: phenomenology of $Q^2\overline{Q}^2$ mesons*, Physical Review D **15**, pp. 267–280, 1977, R. L. Jaffe, *Multiquark hadrons II: methods*, Physical Review D **15**, pp. 281–289, 1977, and R. L. Jaffe, Physical Review D *$Q^2\overline{Q}^2$ resonances in the baryon-antibaryon system*,**17**, pp. 1444–1458, 1978. For a clear and detailed modern summary, see the excellent review by E. Klempt & A. Zaitsev, *Glueballs, hybrids, multiquarks: experimental facts versus QCD inspired concepts*, Physics Reports **454**, pp. 1–202, 2007, preprint at arxiv.org/abs/0708.4016. See also F. Giacosa, *Light scalars as tetraquarks*, preprint at arxiv.org/abs/0711.3126, and

V. Crede & C. A. Meyer, *The experimental status of glueballs*, preprint at arxiv.org/abs/0812.0600. However, other researchers argue against this possibility; see, e.g., arxiv.org/abs/1404.5673v2. The issue is not closed. Cited on page 238.

200 Pentaquarks were first predicted by Maxim Polyakov, Dmitri Diakonov, and Victor Petrov in 1997. Two experimental groups in 2003 claimed to confirm their existence, with a mass of 1540 MeV; see K. Hicks, *An experimental review of the* Θ^+ *pentaquark*, arxiv.org/abs/hep-ex/0412048. Results from 2005 and later, however, ruled out that the 1540 MeV particle is a pentaquark. Cited on page 238.

201 See, for example, Ya. B. Zel'dovich & V. S. Popov, *Electronic structure of superheavy atoms*, Soviet Physics Uspekhi **17**, pp. 673–694, 2004 in the English translation. Cited on page 134.

202 J. Tran Thanh Van, editor, *CP violation in Particle Physics and Astrophysics*, Proc. Conf. Chateau de Bois, France, May 1989, Editions Frontières, 1990. Cited on page 245.

203 P.L. Anthony & al., *Observation of parity nonconservation in Møller scattering*, Physical Review Letters **92**, p. 181602, 2004. Cited on page 246.

204 M. A. Bouchiat & C. C. Bouchiat, *Weak neutral currents in atomic physics*, Physics Letters B **48**, pp. 111–114, 1974. U. Amaldi, A. Böhm, L. S. Durkin, P. Langacker, A. K. Mann, W. J. Marciano, A. Sirlin & H. H. Williams, *Comprehensive analysis of data pertaining to the weak neutral current and the intermediate-vector-boson masses*, Physical Review D **36**, pp. 1385–1407, 1987. Cited on page 246.

205 M. C. Noecker, B. P. Masterson & C. E. Wiemann, *Precision measurement of parity nonconservation in atomic cesium: a low-energy test of electroweak theory*, Physical Review Letters **61**, pp. 310–313, 1988. See also D.M. Meekhof & al., *High-precision measurement of parity nonconserving optical rotation in atomic lead*, Physical Review Letters **71**, pp. 3442–3445, 1993. Cited on page 246.

206 S. C. Bennet & C. E. Wiemann, *Measurement of the 6S – 7S transition polarizability in atomic cesium and an improved test of the standard model*, Physical Review Letters **82**, pp. 2484–2487, 1999. The group has also measured the spatial distribution of the weak charge, the so-called the *anapole moment*; see C.S. Wood & al., *Measurement of parity nonconservation and an anapole moment in cesium*, Science **275**, pp. 1759–1763, 1997. Cited on page 246.

207 C. Jarlskog, *Commutator of the quark mass matrices in the standard electroweak model and a measure of maximal CP nonconservation*, Physical Review Letters **55**, pp. 1039–1042, 1985. Cited on page 251.

208 The correct list of citations is a topic of intense debate. It surely includes Y. Nambu & G. Jona-Lasinio, *Dynamical model of the elementary particles based on an analogy with superconductivity - I*, Physical Review **122**, p. 345-358, 1961, P. W. Anderson, *Plasmons, gauge invariance, and mass*, Physical Review **130**, pp. 439–442, 1963, The list then continues with referenceXem 210. Cited on pages 253 and 404.

209 K. Grotz & H. V. Klapdor, *Die schwache Wechselwirkung in Kern-, Teilchen- und Astrophysik*, Teubner Verlag, Stuttgart, 1989. Also available in English and in several other languages. Cited on page 255.

210 P. W. Higgs, *Broken symmetries, massless particles and gauge fields*, Physics Letters **12**, pp. 132–133, 1964, P. W. Higgs, *Broken symmetries and the masses of the gauge bosons*, Physics Letters **13**, pp. 508–509, 1964. He then expanded the story in P. W. Higgs, *Spontaneous symmetry breakdown without massless bosons*, Physical Review **145**, pp. 1156–1163, 1966. Higgs gives most credit to Anderson, instead of to himself; he also mentions

Brout and Englert, Guralnik, Hagen, Kibble and 't Hooft. These papers are F. Englert & R. Brout, *Broken symmetry and the mass of the gauge vector mesons*, Physics Review Letters **13**, pp. 321–323, 1964, G. S. Guralnik, C. R. Hagen & T. W. B. Kibble, *Global conservations laws and massless particles*, Physical Review Letters **13**, pp. 585–587, 1964, T. W. B. Kibble, *Symmetry breaking in non-Abelian gauge theories*, Physical Review **155**, pp. 1554–1561, 1967. For the ideas that inspired all these publications, see Xem 208. Cited on pages 258 and 403.

211 D. Treille, *Particle physics from the Earth and from the sky: Part II*, Europhysics News **35**, no. 4, 2004. Cited on page 256.

212 Rumination is studied in P. Jordan & de Laer Kronig, in Nature **120**, p. 807, 1927. Cited on page 259.

213 K.W.D. Ledingham & al., *Photonuclear physics when a multiterawatt laser pulse interacts with solid targets*, Physical Review Letters **84**, pp. 899–902, 2000. K.W.D. Ledingham & al., *Laser-driven photo-transmutation of Iodine-129 – a long lived nuclear waste product*, Journal of Physics D: Applied Physics **36**, pp. L79–L82, 2003. R. P. Singhal, K. W. D. Ledingham & P. McKenna, *Nuclear physics with ultra-intense lasers – present status and future prospects*, Recent Research Developments in Nuclear Physics **1**, pp. 147–169, 2004. Cited on page 259.

214 The electron radius limit is deduced from the $g-2$ measurements, as explained in the Nobel Prize talk by Hans Dehmelt, *Experiments with an isolated subatomic particle at rest*, Reviews of Modern Physics **62**, pp. 525–530, 1990, or in Hans Dehmelt, *Is the electron a composite particle?*, Hyperfine Interactions **81**, pp. 1–3, 1993. Cited on page 264.

215 G. Gabrielse, H. Dehmelt & W. Kells, *Observation of a relativistic, bistable hysteresis in the cyclotron motion of a single electron*, Physical Review Letters **54**, pp. 537–540, 1985. Cited on page 264.

216 For the bibliographic details of the latest print version of the *Review of Particle Physics*, see Phụ lục 14. The online version can be found at pdg.web.cern.ch. The present status on grand unification can also be found in the respective section of the overview. Cited on pages 268 and 269.

217 Slides of a very personal review talk by H. Georgi, *The future of grand unification*, can be found at www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~yt100sym/files/yt100sym_georgi.pdf. A modern research approach is S. Raby, *Grand unified theories*, arxiv.org/abs/hep-ph/0608183. Cited on page 269.

218 H. Jeon & M. Longo, *Search for magnetic monopoles trapped in matter*, Physical Review Letters **75**, pp. 1443–1447, 1995. Cited on page 269.

219 The quantization of charge as a consequence of the existence of magnetic monopoles is due to P. Dirac, *Quantised singularities in the electromagnetic Field*, Proceedings of the Royal Society (London) A **133**, pp. 60–72, 1931. Cited on page 269.

220 On proton decay rates, see the latest data of the Particle Data Group, at pdg.web.cern.ch. Cited on page 270.

221 U. Amaldi, de Boer & H. Fürstenau, *Comparison of grand unified theories with electroweak and strong coupling constants measured at LEP*, Physics Letters **260**, pp. 447–455, 1991. This widely cited paper is the standard reference for this issue. An update is found in de Boer & C. Sander, *Global electroweak fits and gauge coupling unification*, Physics Letters B 585 pp. 276–286, 2004, or preprint at arxiv.org/abs/hep-ph/0307049. The figure is taken with permission from the home page of Wim de Boer www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~deboer/html/Forschung/forschung.html. Cited on page 270.

222 Peter G. O. Freund, *Introduction to Supersymmetry*, Cambridge 1988. Julius Wess & Jonathan Bagger, *Supersymmetry and Supergravity*, Princeton University Press, 1992. This widely cited book contains a lot of mathematics but little physics. Cited on page 271.

223 S. Coleman & J. Mandula, *All possible symmetries of the S matrix*, Physical Review **159**, pp. 1251–1256, 1967. Cited on page 271.

224 P. C. Argyres, *Dualities in supersymmetric field theories*, Nuclear Physics Proceedings Supplement **61A**, pp. 149–157, 1998, preprint available at arxiv.org/abs/hep-th/9705076. Cited on page 274.

225 Michael Stone editor, *Bosonization*, World Scientific, 1994. R. Rajaraman, *Solitons and Instantons*, North Holland, 1987. However, the hope of explaining the existence of fermions as the result of an infinite number of interacting bosons – this is what 'bosonization' means – has not been successful. Cited on page 275.

226 In 1997, the smallest human-made flying object was the helicopter built by a group of the Institut für Mikrotechnik in Mainz, in Germany. A picture is available at their web page, to be found at www.imm-mainz.de/English/billboard/f_hubi.html. The helicopter is 24 mm long, weighs 400 mg and flies (though not freely) using two built-in electric motors driving two rotors, running at between 40 000 and 100 000 revolutions per minute. See also the helicopter from Stanford University at www-rpl.stanford.edu/RPL/htmls/mesoscopic/mesicopter/mesicopter.html, with an explanation of its battery problems. Cited on page 279.

227 Henk Tennekes, *De wetten van de vliegkunst – over stijgen, dalen, vliegen en zweven*, Aramith Uitgevers, 1992. This clear and interesting text is also available in English. Cited on page 280.

228 The most recent computational models of lift still describe only two-dimensional wing motion, e.g., Z. J. Wang, *Two dimensional mechanism for insect hovering*, Physical Review Letters 85 pp. 2216–2219, 2000. A first example of a mechanical bird has been constructed by Wolfgang Send; it can be studied on the www.aniprop.de website. See also W. Send, *Physik des Fliegens*, Physikalische Blätter 57, pp. 51–58, June 2001. Cited on page 280.

229 R. B. Srygley & A. L. R. Thomas, *Unconventional lift-generating mechanisms in free-flying butterflies*, Nature **420**, pp. 660–664, 2002. Cited on page 280.

230 The book by John Brackenbury, *Insects in Flight*, 1992. is a wonderful introduction into the biomechanics of insects, combining interesting science and beautiful photographs. Cited on page 282.

231 The simulation of insect flight using enlarged wing models flapping in oil instead of air is described for example in www.dickinson.caltech.edu/research_robofly.html. The higher viscosity of oil allows achieving the same Reynolds number with larger sizes and lower frequencies than in air. See also the 2013 video of the talk on insect flight at www.ted.com/talks/michael_dickinson_how_a_fly_flies.html. Cited on page 282.

232 A summary of undulatory swimming that includes the two beautiful illustrations included in the text, Hình 157 and Hình 158, is M. Gazzola, M. Argentina & L. Mahadevan, *Scaling macroscopic aquatic locomotion*, Nature Physics **10**, pp. 758–761, 2014. Cited on pages 283 and 284.

233 E. Purcell, *Life at low Reynolds number*, American Journal of Physics **45**, p. 3, 1977. See also the review E. Lauga & T. R. Powers, *The hydrodynamics of swimming microorganisms*, Reports on Progress in Physics 72, p. 096601, 2009, preprint at arxiv.org/abs/0812.2887. Cited on page 285.

234 A short but informative review is by S. Vogel, *Modes and scaling in aquatic locomotion*, Integrative and Comparative Biology **48**, pp. 702–712, 2008, available online at icb.oxfordjournals.org/content/48/6/702.full. Cited on page 284.

235 Most bacteria are flattened, ellipsoidal sacks kept in shape by the membrane enclosing the cytoplasma. But there are exceptions; in salt water, quadratic and triangular bacteria have been found. More is told in the corresponding section in the interesting book by Bernard Dixon, *Power Unseen – How Microbes Rule the World*, W.H. Freeman, New York, 1994. Cited on page 286.

236 S. Pitnick, G. Spicer & T. A. Markow, *How long is a giant sperm?*, Nature **375**, p. 109, 1995. Cited on page 286.

237 M. Kawamura, A. Sugamoto & S. Nojiri, *Swimming of microorganisms viewed from string and membrane theories*, Modern Journal of Physics Letters A **9**, pp. 1159–1174, 1994. Also available as arxiv.org/abs/hep-th/9312200. Cited on page 286.

238 W. Nutsch & U. Rüffer, *Die Orientierung freibeweglicher Organismen zum Licht, dargestellt am Beispiel des Flagellaten Chlamydomonas reinhardtii*, Naturwissenschaften **81**, pp. 164–174, 1994. Cited on page 286.

239 They are also called *prokaryote flagella*. See for example S. C. Schuster & S. Khan, *The bacterial flagellar motor*, Annual Review of Biophysics and Biomolecular Structure **23**, pp. 509–539, 1994, or S. R. Caplan & M. Kara-Ivanov, *The bacterial flagellar motor*, International Review of Cytology **147**, pp. 97–164, 1993. See also the information on the topic that can be found on the website www.id.ucsb.edu:16080/fscf/library/origins/graphics-captions/flagellum.html. Cited on page 286.

240 For an overview of the construction and the motion of coli bacteria, see H. C. Berg, *Motile behavior of bacteria*, Physics Today **53**, pp. 24–29, January 2000. Cited on page 286.

241 J. W. Shaevitz, J. Y. Lee & D. A. Fletcher, *Spiroplasma swim by a processive change in body helicity*, Cell **122**, pp. 941–945, 2005. Cited on page 287.

242 This is from the book by David Dusenbery, *Life at a Small Scale*, Scientific American Library, 1996. Cited on page 287.

243 F. Wilczek & A. Zee, *Appearance of gauge structures in simple dynamical systems*, Physical Review Letters **52**, pp. 2111–2114, 1984, A. Shapere & F. Wilczek, *Self-propulsion at low Reynold number*, Physical Review Letters **58**, pp. 2051–2054, 1987, A. Shapere & F. Wilczek, *Gauge kinematics of deformable bodies*, American Journal of Physics **57**, pp. 514–518, 1989, A. Shapere & F. Wilczek, *Geometry of self-propulsion at low Reynolds number*, Journal of Fluid Mechanics **198**, pp. 557–585, 1989, A. Shapere & F. Wilczek, *Efficiencies of self-propulsion at low Reynolds number*, Journal of Fluid Mechanics **198**, pp. 587–599, 1989. See also R. Montgomery, *Gauge theory of the falling cat*, Field Institute Communications **1**, pp. 75–111, 1993. Cited on page 289.

244 E. Putterman & O. Raz, *The square cat*, American Journal of Physics **76**, pp. 1040–1045, 2008. Cited on page 289.

245 J. Wisdom, *Swimming in spacetime: motion by cyclic changes in body shape*, Science **299**, pp. 1865–1869, 21st of March, 2003. A similar effect was discovered later on by E. Guéron & R. A. Mosna, *The relativistic glider*, Physical Review D 75, p. 081501(R), 2007, preprint at arxiv.org/abs/gr-qc/0612131. Cited on page 290.

246 S. Smale, *A classification of immersions of the two-sphere*, Transactions of the American Mathematical Society **90**, pp. 281–290, 1958. Cited on page 292.

247 G.K. Francis & B. Morin, *Arnold Shapiro's Eversion of the Sphere*, Mathematical Intelligencer pp. 200–203, 1979. See also the unique manual for drawing manifolds by

George Francis, *The Topological Picturebook*, Springer Verlag, 1987. It also contains a chapter on sphere eversion. Cited on page 292.

248 B. Morin & J.-P. Petit, *Le retournement de la sphere*, Pour la Science **15**, pp. 34–41, 1979. See also the clear article by A. Phillips, *Turning a surface inside out*, Scientific American pp. 112–120, May 1966. Cited on page 292.

249 S. Levy, D. Maxwell & T. Munzner, *Making Waves – a Guide to the Ideas Behind Outside In*, Peters, 1995. Cited on page 292.

250 George K. Batchelor, *An Introduction to Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, 1967, and H. Hashimoto, *A soliton on a vortex filament*, Journal of Fluid Mechanics **51**, pp. 477–485, 1972. A summary is found in H. Zhou, *On the motion of slender vortex filaments*, Physics of Fluids **9**, p. 970-981, 1997. Cited on page 295.

251 V. P. Dmitriyev, *Helical waves on a vortex filament*, American Journal of Physics **73**, pp. 563–565, 2005, and V. P. Dmitriyev, *Mechanical analogy for the wave-particle: helix on a vortex filament*, arxiv.org/abs/quant-ph/0012008. Cited on page 296.

252 T. Jacobson, *Thermodynamics of spacetime: the Einstein equation of state*, Physical Review Letters **75**, pp. 1260–1263, 1995, or arxiv.org/abs/gr-qc/9504004. Cited on page 298.

253 J. Frenkel & T. Kontorowa, *Über die Theorie der plastischen Verformung*, Physikalische Zeitschrift der Sowietunion **13**, pp. 1–10, 1938. F. C. Frank, *On the equations of motion of crystal dislocations*, Proceedings of the Physical Society A **62**, pp. 131–134, 1949, J. Eshelby, *Uniformly moving dislocations*, Proceedings of the Physical Society A **62**, pp. 307–314, 1949. See also G. Leibfried & H. Dietze, Zeitschrift für Physik **126**, p. 790, 1949. A general introduction can be found in A. Seeger & P. Schiller, *Kinks in dislocations lines and their effects in internal friction in crystals*, Physical Acoustics **3A**, W. P. Mason, ed., Academic Press, 1966. See also the textbooks by Frank R. N. Nabarro, *Theory of Crystal Dislocations*, Oxford University Press, 1967, or J. P. Hirth & J. Lothe, *Theory of Dislocations*, McGraw Hills Book Company, 1968. Cited on page 299.

254 Enthusiastic introductions into the theoretical aspects of polymers are the books by Alexander Yu. Grosberg & Alexei R. Khokhlov, *Statistical Physics of Macromolecules*, AIP, 1994, and Pierre-Gilles de Gennes, *Scaling Concepts in Polymer Physics*, Cornell University Press, 1979. See also the review by P.-G. de Gennes, *Soft matter*, Reviews of Modern Physics **63**, p. 645, 1992. Cited on page 300.

255 The master of combining research and enjoyment in mathematics is Louis Kauffman. An example is his art is the beautiful text Louis H. Kauffman, *Knots and Physics*, World Scientific, third edition, 2001. It gives a clear introduction to the mathematics of knots and their applications. Cited on page 302.

256 A good introduction to knot tabulation is the paper by J. Hoste, M. Thistlethwaite & J. Weeks, *The first 1,701,936 knots*, The Mathematical Intelligencer **20**, pp. 33–47, 1998. Cited on page 303.

257 I. Stewart, *Game, Set and Math*, Penguin Books, 1989, pp. 58–67. Cited on page 303.

258 P. Pieranski, S. Przybyl & A. Stasiak, *Tight open knots*, arxiv.org/abs/physics/0103016. No citations.

259 T. Ashton, J. Cantarella, M. Piatek & E. Rawdon, *Self-contact sets for 50 tightly knotted and linked tubes*, arxiv.org/abs/math/0508248. Cited on page 304.

260 J. Cantarella, J. H. G. Fu, R. Kusner, J. M. Sullivan & N. C. Wrinkle, *Criticality for the Gehring link problem*, Geometry and Topology **10**, pp. 2055–2116, 2006, preprint at arxiv.org/abs/math/0402212. Cited on page 305.

261 W. R. Taylor, *A deeply knotted protein structure and how it might fold*, Nature **406**, pp. 916–919, 2000. Cited on page 307.

262 Alexei Sossinsky, *Nœuds – histoire d'une théorie mathématique*, Editions du Seuil, 1999. D. Jensen, *Le poisson noué*, Pour la science, dossier hors série, pp. 14–15, April 1997. Cited on page 306.

263 D. M. Raymer & D. E. Smith, *Spontaneous knotting of an agitated string*, Proceedings of the National Academy of Sciences (USA) **104**, pp. 16432–16437, 2007, or www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0611320104. This work won the humorous Ignobel Prize in Physics in 2008; seeimprobable.com/ig. Cited on page 307.

264 A. C. Hirshfeld, *Knots and physics: Old wine in new bottles*, American Journal of Physics **66**, pp. 1060–1066, 1998. Cited on page 307.

265 For some modern knot research, see P. Holdin, R. B. Kusner & A. Stasiak, *Quantization of energy and writhe in self-repelling knots*, New Journal of Physics **4**, pp. 20.1–20.11, 2002. Cited on page 308.

266 H. R. Pruppacher & J. D. Klett, *Microphysics of Clouds and Precipitation*, Reidel, 1978, pp. 316–319. Falling drops are flattened and look like a pill, due to the interplay between surface tension and air flow. See also U. Thiele, *Weine nicht, wenn der Regen zerfällt*, Physik Journal **8**, pp. 16–17, 2009. Cited on page 308.

267 J. J. Socha, *Becoming airborne without legs: the kinematics of take-off in a flying snake, Chrysopelea paradisi*, Journal of Experimental Biology **209**, pp. 3358–3369, 2006, J. J. Socha, T. O'Dempsey & M. LaBarbera, *A three-dimensional kinematic analysis of gliding in a flying snake, Chrysopelea paradisi*, Journal of Experimental Biology **208**, pp. 1817–1833, 2005, J. J. Socha & M. LaBarbera, *Effects of size and behavior on aerial performance of two species of flying snakes (Chrysopelea)*, Journal of Experimental Biology **208**, pp. 1835–1847, 2005. A full literature list on flying snakes can be found on the website www.flyingsnake.org. Cited on page 309.

268 An informative account of the world of psychokinesis and the paranormal is given by the famous professional magician James Randi, *Flim-flam!*, Prometheus Books, Buffalo 1987, as well as in several of his other books. See also the www.randi.org website. No citations.

269 James Clerk Maxwell, *Scientific Papers*, **2**, p. 244, October 1871. Cited on page 319.

270 A good introduction is C. J. Hogan, *Why the universe is just so*, Reviews of Modern Physics 72, pp. 1149–1161, 2000. Most of the material of Bảng 27 is from the mighty book by John D. Barrow & Frank J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, 1986. Discarding unrealistic options is also an interesting pastime. See for example the reasons why life can only be carbon-based, as explained in the essay by I. Asimov, *The one and only*, in his book *The Tragedy of the Moon*, Doubleday, Garden City, New York, 1973. Cited on pages 319 and 383.

271 L. Smolin, *The fate of black hole singularities and the parameters of the standard models of particle physics and cosmology*, arxiv.org/abs/gr-qc/9404011. Cited on page 321.

272 Aristotle, *Treaty of the heaven*, III, II, 300 b 8. See Jean-Paul Dumont, *Les écoles présocratiques*, Folio Essais, Gallimard, p. 392, 1991. Cited on page 324.

273 *Le Système International d'Unités*, Bureau International des Poids et Mesures, Pavillon de Breteuil, Parc de Saint Cloud, 92310 Sèvres, France. All new developments concerning SI units are published in the journal *Metrologia*, edited by the same body. Showing the slow pace of an old institution, the BIPM launched a website only in 1998; it is now reachable at www.bipm.fr. See also the www.utc.fr/~tthomass/Themes/Unites/index.html website; this includes the biographies of people who gave their names to various units. The site of its

British equivalent, www.npl.co.uk/npl/reference, is much better; it provides many details as well as the English-language version of the SI unit definitions. No citations.

274 The bible in the field of time measurement is the two-volume work by J. Vanier & C. Audoin, *The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards*, Adam Hilge, 1989. A popular account is Tony Jones, *Splitting the Second*, Institute of Physics Publishing, 2000.

The site opdafl.obspm.fr/www/lexique.html gives a glossary of terms used in the field. For precision *length* measurements, the tools of choice are special lasers, such as mode-locked lasers and frequency combs. There is a huge literature on these topics. Equally large is the literature on precision *electric current* measurements; there is a race going on for the best way to do this: counting charges or measuring magnetic forces. The issue is still open. On *mass* and atomic mass measurements, see Trang 73 in volume II. On high-precision *temperature* measurements, see Trang 545 in volume I. Cited on page 326.

275 The unofficial SI prefixes were first proposed in the 1990s by Jeff K. Aronson of the University of Oxford, and might come into general usage in the future. See New Scientist **144**, p. 81, 3 December 1994. Other, less serious proposals also exist. No citations.

276 For more details on electromagnetic unit systems, see the standard text by John David Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd edition, Wiley, 1998. No citations.

277 D.J. Bird & al., *Evidence for correlated changes in the spectrum and composition of cosmic rays at extremely high energies*, Physical Review Letters **71**, pp. 3401–3404, 1993. No citations.

278 P. J. Hakonen, R. T. Vuorinen & J. E. Martikainen, *Nuclear antiferromagnetism in rhodium metal at positive and negative nanokelvin temperatures*, Physical Review Letters **70**, pp. 2818–2821, 1993. See also his article in Scientific American, January 1994. No citations.

279 A. Zeilinger, *The Planck stroll*, American Journal of Physics **58**, p. 103, 1990. Can you find another similar example? Cited on page 331.

Câu đố 191 e

280 An overview of this fascinating work is given by J. H. Taylor, *Pulsar timing and relativistic gravity*, Philosophical Transactions of the Royal Society, London A **341**, pp. 117–134, 1992. No citations.

281 The most precise clock built in 2004, a caesium fountain clock, had a precision of one part in 10^{15}. Higher precision has been predicted to be possible soon, among others by M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi & H. Katori, *An optical lattice clock*, Nature **435**, pp. 321–324, 2005. No citations.

282 J. Bergquist, ed., *Proceedings of the Fifth Symposium on Frequency Standards and Metrology*, World Scientific, 1997. No citations.

283 See the information on $D_s^{\pm}$ mesons from the particle data group at pdg.web.cern.ch/pdg. No citations.

284 About the long life of tantalum 180, see D. Belic & al., *Photoactivation of* $^{180}\mathrm{Ta}^{m}$ *and its implications for the nucleosynthesis of nature's rarest naturally occurring isotope*, Physical Review Letters **83**, pp. 5242–5245, 20 December 1999. No citations.

285 The various concepts are even the topic of a separate international standard, ISO 5725, with the title *Accuracy and precision of measurement methods and results.* A good introduction is John R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis: the Study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2nd edition, University Science Books, Sausalito, 1997. No citations.

286 P.J. Mohr, B.N. Taylor & D.B. Newell, *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010*, preprint at arxiv.org/abs/1203.5425. This is the set of constants resulting from an international adjustment and recommended for international use by the Committee on Data for Science and Technology (CODATA), a body in the

International Council of Scientific Unions, which brings together the International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP), the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) and other organizations. The website of IUPAC is www.iupac.org. Cited on page 401.

287 Some of the stories can be found in the text by N. W. Wise, *The Values of Precision*, Princeton University Press, 1994. The field of high-precision measurements, from which the results on these pages stem, is a world on its own. A beautiful introduction to it is J. D. Fairbanks, B. S. Deaver, C. W. Everitt & P. F. Michaelson, eds., *Near Zero: Frontiers of Physics*, Freeman, 1988. No citations.

288 For details see the well-known astronomical reference, P. Kenneth Seidelmann, *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*, 1992. Cited on page 339.

289 See the corresponding reference in the first volume. Cited on page 341.

290 The proton charge radius was determined by measuring the frequency of light emitted by hydrogen atoms to high precision by T. Udem, A. Huber, B. Gross, J. Reichert, M. Prevedelli, M. Weitz & T. W. Hausch, *Phase-coherent measurement of the hydrogen 1S–2S transition frequency with an optical frequency interval divider chain*, Physical Review Letters **79**, pp. 2646–2649, 1997. Cited on page 342.

291 For a full list of isotopes, see R. B. Firestone, *Table of Isotopes, Eighth Edition, 1999 Update*, with CD-ROM, John Wiley & Sons, 1999. For a list of isotopes on the web, see the Corean website by J. Chang, atom.kaeri.re.kr. For a list of precise isotope masses, see the csnwww.in2p3.fr website. Cited on pages 343, 346, and 357.

292 The ground state of bismuth 209 was thought to be stable until early 2003. It was then discovered that it was radioactive, though with a record lifetime, as reported by P. de Marcillac, N. Coron, G. Dambier, J. Leblanc & J.-P. Moalic, *Experimental detection of α-particles from the radioactive decay of natural bismuth*, Nature **422**, pp. 876–878, 2003. By coincidence, the excited state 83 MeV above the ground state of the same bismuth 209 nucleus is the shortest known radioactive nuclear state. Cited on page 343.

293 For information on the long life of tantalum 180, see D. Belic & al., *Photoactivation of* $^{180}\mathrm{Ta}^{\mathrm{m}}$ *and its implications for the nucleosynthesis of nature's rarest naturally occurring isotope*, Physical Review Letters **83**, pp. 5242–5245, 20 December 1999. Cited on page 343.

294 Stephen J. Gould, *The Panda's Thumb*, W.W. Norton & Co., 1980. This is one of several interesting and informative books on evolutionary biology by the best writer in the field. Cited on page 344.

295 F. Marques & al., *Detection of neutron clusters*, Physical Review C **65**, p. 044006, 2002. Opposite results have been obtained by B. M. Sherrill & C. A. Bertulani, *Proton-tetraneutron elastic scattering*, Physical Review C **69**, p. 027601, 2004, and D.V. Aleksandrov & al., *Search for resonances in the three- and four-neutron systems in the 7Li(7Li, 11C)3n and 7Li(7Li, 10C)4n reactions*, JETP Letters **81**, p. 43, 2005. No citations.

296 For a good review, see the article by P. T. Greenland, *Antimatter*, Contemporary Physics **38**, pp. 181–203, 1997. Cited on page 344.

297 Almost everything known about each element and its chemistry can be found in the encyclopaedic Gmelin, *Handbuch der anorganischen Chemie*, published from 1817 onwards. There are over 500 volumes, now all published in English under the title *Handbook of Inorganic and Organometallic Chemistry*, with at least one volume dedicated to each chemical element. On the same topic, an incredibly expensive book with an equally bad layout is Per Enhag, *Encyclopedia of the Elements*, Wiley–VCH, 2004. Cited on page 346.

298 The atomic masses, as given by IUPAC, can be found in Pure and Applied Chemistry **73**, pp. 667–683, 2001, or on the www.iupac.org website. For an isotope mass list, see the csnwww.in2p3.fr website. Cited on pages 346 and 357.

299 The metallic, covalent and Van der Waals radii are from NATHANIEL W. ALCOCK, *Bonding and Structure*, Ellis Horwood, 1999. This text also explains in detail how the radii are defined and measured. Cited on page 357.

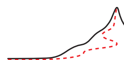
300 M. FLATO, P. SALLY & G. ZUCKERMAN (editors), *Applications of Group Theory in Physics and Mathematical Physics*, Lectures in applied mathematics, volume 21, American Mathematical Society, 1985. This interesting and excellent book is well worth reading. Cited on page 363.

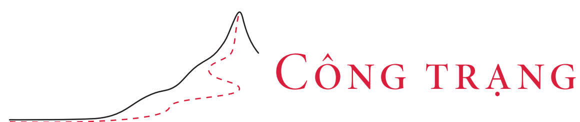
301 For more puzzles, see the excellent book JAMES TANTON, *Solve This – Math Activities for Studends and Clubs*, Mathematical Association of America, 2001. Cited on page 364.

302 For an introduction to topology, see for example MIKIO NAKAHARA, *Geometry, Topology and Physics*, IOP Publishing, 1990. Cited on page 364.

303 An introduction to the classification theorem is R. SOLOMON, *On finite simple groups and their classification*, Notices of the AMS **42**, pp. 231–239, 1995, also available on the web as www.ams.org/notices/199502/solomon.ps Cited on page 369.

304 A pedagogical explanation is given by C. G. WOHL, *Scientist as detective: Luis Alvarez and the pyramid burial chambers, the JFK assassination, and the end of the dinosaurs*, American Journal of Physics 75, pp. 968–977, 2007. Cited on page 378.





Công trạng

Lời cám ơn

Many people who have kept their gift of curiosity alive have helped to make this project come true. Most of all, Peter Rudolph and Saverio Pascazio have been – present or not – a constant reference for this project. Fernand Mayné, Anna Koolen, Ata Masafumi, Roberto Crespi, Serge Pahaut, Luca Bombelli, Herman Elswijk, Marcel Krijn, Marc de Jong, Martin van der Mark, Kim Jalink, my parents Peter and Isabella Schiller, Mike van Wijk, Renate Georgi, Paul Tegelaar, Barbara and Edgar Augel, M. Jamil, Ron Murdock, Carol Pritchard, Richard Hoffman, Stephan Schiller, Franz Aichinger and, most of all, my wife Britta have all provided valuable advice and encouragement.

Many people have helped with the project and the collection of material. Most useful was the help of Mikael Johansson, Bruno Barberi Gnecco, Lothar Beyer, the numerous improvements by Bert Sierra, the detailed suggestions by Claudio Farinati, the many improvements by Eric Sheldon, the detailed suggestions by Andrew Young, the continuous help and advice of Jonatan Kelu, the corrections of Elmar Bartel, and in particular the extensive, passionate and conscientious help of Adrian Kubala.

Important material was provided by Bert Peeters, Anna Wierzbicka, William Beaty, Jim Carr, John Merrit, John Baez, Frank DiFilippo, Jonathan Scott, Jon Thaler, Luca Bombelli, Douglas Singleton, George McQuarry, Tilman Hausherr, Brian Oberquell, Peer Zalm, Martin van der Mark, Vladimir Surdin, Julia Simon, Antonio Fermani, Don Page, Stephen Haley, Peter Mayr, Allan Hayes, Norbert Dragon, Igor Ivanov, Doug Renselle, Wim de Muynck, Steve Carlip, Tom Bruce, Ryan Budney, Gary Ruben, Chris Hillman, Olivier Glassey, Jochen Greiner, squark, Martin Hardcastle, Mark Biggar, Pavel Kuzin, Douglas Brebner, Luciano Lombardi, Franco Bagnoli, Lukas Fabian Moser, Dejan Corovic, Paul Vannoni, John Haber, Saverio Pascazio, Klaus Finkenzeller, Leo Volin, Jeff Aronson, Roggie Boone, Lawrence Tuppen, Quentin David Jones, Arnaldo Uguzzoni, Frans van Nieuwpoort, Alan Mahoney, Britta Schiller, Petr Danecek, Ingo Thies, Vitaliy Solomatin, Carl Offner, Nuno Proença, Elena Colazingari, Paula Henderson, Daniel Darre, Wolfgang Rankl, John Heumann, Joseph Kiss, Martha Weiss, Antonio González, Antonio Martos, André Slabber, Ferdinand Bautista, Zoltán Gácsi, Pat Furrie, Michael Reppisch, Enrico Pasi, Thomas Köppe, Martin Rivas, Herman Beeksma, Tom Helmond, John Brandes, Vlad Tarko, Nadia Murillo, Ciprian Dobra, Romano Perini, Harald van Lintel, Andrea Conti, François Belfort, Dirk Van de Moortel, Heinrich Neumaier, JarosThlaw Królikowski, John Dahlman, Fathi Namouni, Paul Townsend, Sergei Emelin, Freeman Dyson, S.R. Madhu Rao, David Parks, Jürgen Janek, Daniel Huber, Alfons Buchmann, William Purves, Pietro Redondi, Douglas Singleton, Emil Akhmedov Damoon Saghian, Zach Joseph Espiritu, Miles Mutka, plus a number of people who wanted to remain unnamed.

The software tools were refined with extensive help on fonts and typesetting by Michael Zedler and Achim Blumensath and with the repeated and valuable support of Donald Arseneau; help came also from Ulrike Fischer, Piet van Oostrum, Gerben Wierda, Klaus Böhncke, Craig

Upright, Herbert Voss, Andrew Trevorrow, Danie Els, Heiko Oberdiek, Sebastian Rahtz, Don Story, Vincent Darley, Johan Linde, Joseph Hertzlinger, Rick Zaccone, John Warkentin, Ulrich Diez, Uwe Siart, Will Robertson, Joseph Wright, Enrico Gregorio, Rolf Niepraschk, Alexander Grahn and Paul Townsend.

The typesetting and book design is due to the professional consulting of Ulrich Dirr. The typography was much improved with the help of Johannes Küster and his Minion Math font. The design of the book and its website also owe much to the suggestions and support of my wife Britta.

I also thank the lawmakers and the taxpayers in Germany, who, in contrast to most other countries in the world, allow residents to use the local university libraries.

From 2007 to 2011, the electronic edition and distribution of the Motion Mountain text was generously supported by the Klaus Tschira Foundation.

Công trạng phần Film

The animation of the actin–myosin system on Trang 22 is copyright and courtesy by San Diego State University, Jeff Sale and Roger Sabbadini. It can be found on the website www.sci.sdsu.edu/movies/actin_myosin.html. The film on Trang 118, showing single electrons moving through liquid helium, is copyright and courtesy of Humphrey Maris; it can be found on his website physics.brown.edu/physics/researchpages/cme/bubble. The film of the spark chamber showing the cosmic rays on Trang 176 is courtesy and copyright of Wolfgang Rueckner and Allen Crockett and found on isites.harvard.edu/icb. The film of the solar flare on Trang 207 was taken by NASA's TRACE satellite, whose website is trace.lmsal.com. The film of a flying snake on Trang 309 is copyright and courtesy by Jake Socha. It can be found on his website www.flyingsnake.org.

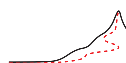
Công trạng phần hình ảnh

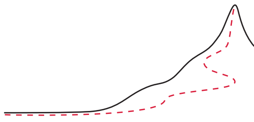
The photograph of the east side of the Langtang Lirung peak in the Nepalese Himalayas, shown on the front cover, is courtesy and copyright by Kevin Hite and found on his blog thegettingthere.com. The photograph of a soap bubble on Trang 14 is courtesy and copyright of Jason Tozer for Creative Review/Sony; its making is described on creativereview.co.uk/crblog. The whale photograph on Trang 16 is courtesy by the NOAA in the USA. The photograph of a baobab with elephant is courtesy and copyright by Ferdinand Reus. The picture of the orchid on Trang 19 is courtesy and copyright of Elmar Bartel. The sea urchin photograph on Trang 23 was taken by Kristina Yu, and is copyright and courtesy of the Exploratorium, found at www.exploratorium.edu. The photograph of the piezoelectric motor on Trang 25 is courtesy and copyright of Piezomotor AB and is found on their website www.piezomotor.se. The beautiful illustration of ATP synthase on Trang 26 is courtesy and copyright of Joachim Weber and is found on his website www.depts.ttu.edu/chemistry/Faculty/weber. The images of embronic nodes on Trang 28 are courtesy and copyright by Hirokawa Nobutaka and found in the cited paper. The illustration of the pleasure system in the human brain on Trang 56 is courtesy of the NIH and can be found, e.g., on the website irp.drugabuse.gov/NRB/technical/RFCMRI.php. The wonderful table of the elements on Trang 61 is courtesy and copyright of Theodore Gray and is for sale at www.theodoregray.com. The image of the water molecule on Trang 62 is copyright of Benjah-bmm27 and is found on Wikimedia. The illustrations of DNA on Trang 64 are copyright and courtesy by David Deerfield and dedicated to his memory. They are taken from his website www.psc.edu/~deerfiel/Nucleic_Acid-SciVis.html. The images of DNA molecules on Trang 65 are copyright and courtesy by Hans-Werner Fink and used with permission of Wiley VCH. The beautiful illustration of star sizes on Trang 68 is courtesy and copyright of Dave Jarvis and found on Wikimedia. The photographs of rocks on Trang 70

are copyright and courtesy of Siim Sepp; they can be found on his wonderful website www.sandatlas.org. The photograph of the marble is a detail of the Rape of Proserpina by Gian Lorenzo Bernini and is courtesy of Wikimedia; the marble can be admired in the Galleria Borghese in Rome. The rhenium photographs on Trang 73 are courtesy of Hans-Werner Fink and copyright and courtesy of the American Physical Society; they are found at journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.52.1532. The pictures of snow flakes on Trang 74 are courtesy and copyright of Furukawa Yoshinori; his website is www.lowtem.hokudai.ac.jp/~frkw/index_e.html. The mineral photographs on Trang 75 onwards are copyright and courtesy of Rob Lavinsky at irocks.com, and taken from his large and beautiful collection there and at www.mindat.org/photo-49529.html. The photograph of natural corundum on Trang 76, the malachite photograph on Trang 174 and the magnetite photograph on page Trang 176 are copyright and courtesy of Stephan Wolfsried and taken from his beautiful collection of microcrystals at www.mindat.org/user-1664.html. The photograph of synthetic corundum on Trang 77 is copyright of the Morion Company at www.motioncompany.com and courtesy of Uriah Prichard. The photograph of Paraiba tourmalines on page Trang 77 is copyright and courtesy of Manfred Fuchs and found on his website at www.tourmalinavitalis.de. The photograph of the large corundum single crystal, usually falsely called 'sapphire', is cortesy and copyright of GT Advanced and found on www.gtat.com. The synthetic crystals photographs on Trang 78 and later are copyright of Northrop Grumman and courtesy of Scott Griffin. The alexandrite photographs on Trang 78 are copyright and courtesy of John Veevaert and Trinity Mineral Co., trinityminerals.com. The photograph of PZT – lead zirconium titanate – products on Trang 79 is copyright and courtesy of Ceramtec. The photograph of synthetic diamond on Trang 80 is copyright and courtesy of Diamond Materials GmbH. The photograph of a diamond knife on Trang 80 is copyright and courtesy of Diamatrix. The photographs of the silicon crystal growing machines and of the resulting silicon crystals on Trang 81 are copyright of PVATePla at www.PVATePla.com, and are used by kind permission of Gert Fisahn. The photograph of hydroxylapatite on Trang 82 is copyright and courtesy of Aksel Österlöf. The shark teeth photograph on Trang 82 is courtesy and copyright of Peter Doe and found at www.flickr.com/photos/peteredin. The photograph of a copper single crystal on Trang 82 is courtesy and copyright of Lachlan Cranswick. The photographs of the natural quasicrystal and its propeties on Trang 82 are copyright and courtesy of Luca Bindi and Paul Steinhardt. The photograph and drawings of a switchable mirror on Trang 85 are courtesy and copyright Ronald Griessen and found on his website www.nat.vu.nl/~griessen. The drawing of an Ashby chart on Trang 88 is courtesy and copyright of Carol Livermore; it is found in the MIT OpenCourseWare course materials for 6.777J / 2.372J *Design and Fabrication*. The insect leg images on Trang 90 are copyright and courtesy of the Max Planck Gesellschaft and found in the cited article. The photographs of bone structure on Trang 92 is courtesy of Peter Fratzl and copyright of him and Physik Journal. The photograph of a bystander with light and terahertz waves on Trang 93 are courtesy of the Jefferson Lab. The climate graph on Trang 95 is copyright and courtesy of Dieter Lüthi. The images of crystal growth techniques on Trang 96 are copyright of the Ivan Golota and used with his permission and that of Andrey Vesselovsky. The photograph of a Hall probe on Trang 97 is courtesy and copyright Metrolab, and found on their website at www.metrolab.com. The collection of images of single atom sheets on Trang 98 is taken fromXem 73, copyright of the National Academy of Sciences, and are courtesy of the authors and of Tiffany Millerd. The graphene photograph on Trang 98 is copyright and courtesy of Andre Geim. The photographs on Trang 99 are copyright and courtesy of tapperboy and Diener Electronics. The photograph of a piece of aerogel on Trang 100 is courtesy of NASA. The photograph of transistors on Trang 101 is copyright and courtesy of Benedikt Seidl and found on Wikimedia; the chip image is copyright and courtesy of the Ioactive blog at blog.ioactive.com. The photograph of the fountain effect on Trang 104 is courtesy and copyright of the Pacific

Institute of Theoretical Physics. The photograph of a vortex lattice on Trang 105 is copyright of Andre Schirotzek, courtesy of Wolfgang Ketterle, and found on their research website at cua.mit.edu/ketterle_group. The photograph of a laser delay line on Trang 114 is courtesy and copyright of the Laser Zentrum Hannover. The photograph of the violin on Trang 116 is copyright Franz Aichinger and courtesy of EOS. The figure of the floating display is copyright and courtesy of Burton Inc. and found on www.burton-jp.com. The photograph of the guide star laser on Trang 117 is courtesy and copyright of ESO and Babak Tafreshi. The photograph of the helium gyroscope on Trang 119 is courtesy and copyright of Eric Varoquaux. The pictures of rainbows on Trang 138 are courtesy and copyright of ed g2s, found on Wikimedia, and of Christophe Afonso, found on his beautiful site www.flickr.com/photos/chrisafonso21. The picture of neutron interferometers on Trang 142 is courtesy and copyright of Helmut Rauch and Erwin Seidl, and found on the website of the Atominstitut in Vienna at www.ati.ac.at. The simulated view of a black hole on Trang 145 is copyright and courtesy of Ute Kraus and can be found on her splendid website www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de. The map with the γ ray bursts on Trang 152 is courtesy of NASA and taken from the BATSE website at www.batse.msfc.nasa.gov/batse. The baobab photograph on Trang 161 is copyright and courtesy of Bernard Gagnon and found on Wikimedia. The photograph of the MRI machine on Trang 163 is courtesy and copyright of Royal Philips Electronics. The MRI images of the head and the spine on Trang 163 are courtesy and copyright of Joseph Hornak and taken from his website www.cis.rit.edu/htbooks/mri. The image of the birth on Trang 164is courtesy and copyright of C. Bamberg. The photograph of the Big European Bubble Chamber on Trang 168 is courtesy and copyright of CERN. On Trang 169, the photograph of the Wilson cloud chamber is courtesy and copyright of Wiemann Lehrmittel; the picture of α rays taken by Patrick Blackett is courtesy and copyright of the Royal Society. The electroscope photograph on Trang 173 is courtesy and copyright of Harald Chmela and taken from his website www.hcrs.at. The photograph of Vicor Hess on Trang 174 has no known copyright. The photograph of the Geigerpod on Trang 176 is courtesy and copyright of Joseph Reinhardt, and found on his website flickr.com/photos/javamoose. The photograph of the Moon shadow on Trang 177 is courtesy and copyright of CERN and found on cerncourier.com/cws/article/cern/28658. The photograph of an aurora on Trang 178 is courtesy and copyright of Jan Curtis and taken from his website climate.gi.alaska.edu/Curtis/curtis.html. The photograph of the spectrometer on Trang 182 is courtesy and copyright of the Hungarian Academy of Sciences and found at www.atomki.hu/hekal/muszaki_hatter/ams_en.html. The figure of the Erta Ale volcano on Trang 185 is courtesy and copyright of Marco Fulle and part of the wonderful photograph collection at www.stromboli.net. The photograph of the NMR machine on Trang 193 is courtesy and copyright of Bruker and found on their website www.bruker.com. The stunning photographs of the solar corona on Trang 206 are copyright of Miloslav Druckmüller and his team, including Peter Aniol, Vojtech Rušin, Ľubomír Klocok, Karel Martišek and Martin Dietzel. The images are part of the fascinating site www.zam.fme.vutbr.cz/~druck/Eclipse/Index.htm and used here with the permission of Miloslav Druckmüller. The drawing on nucleic binding energies on Trang 210is courtesy and copyright of the Max Planck Institute for Gravitational Physics. The drawing of the JET reactor on Trang 212 is courtesy and copyright of EFDA-JET. On Trang 215, the photograph of the Crab nebula is courtesy NASA and ESA; the photograph of the Dumbbell nebula is courtesy and copyright Bill Snyder and was featured on apod.nasa.gov/apod/ap111227.html The graph of the nuclide abundances on Trang 217 is courtesy and copyright of Thomas Janka. The photograph of the Proton Synchroton on Trang 222 is copyright and courtesy of CERN. The drawing of the strong coupling constant on page Trang 232 is courtesy and copyright of Siegfried Bethke. The photograph of the quark jet on Trang 237 is courtesy and copyright of DESY. On Trang 241, the photograph of the watch is courtesy and copyright of Traser and found at www.traser.com; the spectrum is courtesy of the Katrin collaboration. The

photographs of the neutrino collision on Trang 243 and of the W and Z boson experiments on Trang 244 and Trang 245 are courtesy and copyright ofCERN. On Trang 249, the photograph of the experimental set-up is copyright and courtesy of the Brookhaven National Laboratory; the measurement result is copyright and courtesy of the Nobel Foundation. The photograph of the Sudbury Neutrino Observatory on Trang 257 is courtesy and copyright SNO, and found on their website at www.sno.phy.queensu.ca/sno/images. The unification graph on Trang 270 is courtesy and copyright of W. de Boer and taken from his home page at www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~deboer. The graph on unification on Trang 276 is courtesy and copyright of CERN. The picture of the butterfly in a wind tunnel on Trang 279 is courtesy and copyright of Robert Srygley and Adrian Thomas. On Trang 281, the picture of the vulture is courtesy and copyright of S.L. Brown from the website SLBrownPhoto.com; the picture of the hummingbird is courtesy and copyright of the Pennsylvania Game Commission and Joe Kosack and taken from the website www.pgc.state.pa.us; the picture of the dragonfly is courtesy and copyright of nobodythere and found on his website xavier.favre2.free.fr/coppermine. The pictures of feathers insects on Trang 282 are material used with kind permission of HortNET, a product of The Horticulture and Food Research Institute of New Zealand. The figures on Trang 283 and Trang 284 are copyright of L. Mahadevan and courtesy of Macmillan. The picture of the scallop on Trang 285 is courtesy and copyright of Dave Colwell. The historical cat photographs on Trang 288 are by Etienne-Jules Marey and have no copyright. The picture of cliff diver Artem Silchenko on Trang 288 is copyright of the World High Diving Federation, found at the web site www.whdf.com, and courtesy of Frederic Weill. The picture of the eversion of the sphere on Trang 292 is courtesy and copyright of John Sullivan and found on his *Optiverse* website on new.math.uiuc.edu/optiverse. The photograph of a waterspout on Trang 294 is copyright and courtesy of Zé Nogueira and found on his website at www.flickr.com/photos/zenog. The drawing of a mixed dislocation on Trang 299 has been produced especially for this text and is copyright and courtesy of Ulrich Kolberg. The knot and link diagrams on pages 302 and 306 are courtesy and copyright of Robert Scharein and taken from his website on www.knotplot.com. The images of the tight knots on Trang 304 are copyright and courtesy of Piotr Pieranski. The clasp images on Trang 305 is courtesy and copyright of Jason Cantarella. The photograph of a hagfish on Trang 306 is courtesy and copyright of Christine Ortlepp; it is also found on the web page www.lemonodor.com/scruz-2003-01-24/17m.shtml. The disordered knot images on Trang 306 are courtesy and copyright of PNAS. The MRI image on Trang 399 of a married couple is courtesy and copyright of Willibrord Weijmar Schultz. The photograph on the back cover, of a basilisk running over water, is courtesy and copyright by the Belgian group TERRA vzw and found on their website www.terravzw.org. All drawings are copyright by Christoph Schiller. If you suspect that your copyright is not correctly given or obtained, this has not been done on purpose; please contact me in this case.





Bảng tra cứu nhân danh

C

D

H

M

N

O

P

S
Singleton

T

U

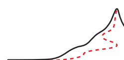
V

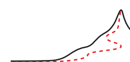
W

X

Y

Z





HÀNH SƠN

Cuộc phiêu lưu của Vật lý – Quyển V

Chuyển động bên trong vật chất
Niềm hoan lạc, công nghệ và ngôi sao



Nền tảng của cuộc sống là những hiệu ứng lượng tử nào?
Cơ thể của chúng ta có bao nhiêu động cơ?
Giác quan của chúng ta hoạt động như thế nào?
Tinh thể nào được sử dụng trong đời sống hằng ngày?
Năng lượng của chân không là gì?
Cơ chế của hiện tượng cộng hưởng từ là gì?
Nguồn gốc của các nguyên tử trong cơ thể của chúng ta?
Tại sao các ngôi sao lại toả sáng?
Những bài toán vật lý nào chưa giải được?

Qua việc trả lời các câu hỏi về chuyển động, bộ sách này giới thiệu cho các bạn một phần vật lý hiện đại thú vị và nhức đầu – vì bạn sẽ ngạc nhiên và bị thử thách trên từng trang sách. Khởi đi từ cuộc sống hằng ngày, cuộc thám hiểm này sẽ cung cấp cho các bạn một tổng quan về các thành quả mới nhất trong Cơ học, Nhiệt học, Điện từ học, Thuyết tương đối, Vật lý lượng tử và Lý thuyết thống nhất.

Christoph Schiller, PhD Université Libre de Bruxelles, là một nhà vật lý và là người viết sách phổ biến vật lý. Ông viết bộ sách này cho con mình đọc và cũng dành cho mọi học sinh, giáo viên và độc giả quan tâm đến vật lý - khoa học về sự chuyển động.

Ấn bản miễn phí dạng Pdf có tại
www.motionmountain.net

